SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bruno Cerovečki

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori: Student:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing. Bruno Cerovečki

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, pomoći, strpljenu i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na velikoj pomoći, strpljenju i danim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije na omogućavanju izvođenja eksperimentalnog rada kao i na njihovoj pomoći.

Posebnu zahvalu iskazujem svojim roditeljima, bratu, djevojci i najužoj rodbini na najvećoj podršci tijekom studiranja.

Na kraju, posvetio bih ovaj rad svojem ocu Zlatku.

Bruno Cerovečki

_____

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BRUNO CEROVEČKI** Mat. br.: 0035192025

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena D-Arc postupka za zavarivanje debelostjenih konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of D-Arc process for welding of thick-walled structures**

Opis zadatka:

Navesti načine prijenosa metala u električnom luku za različita područja parametara zavarivanja kod MAG postupka. Detaljno obraditi modificiranu inačicu MAG postupka koja za prijenos metala primjenjuje zakopani električni luk (D Arc). Opisati prednosti i nedostatke ovog postupka u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom. Analizirati pojave u električnom luku koje se javljaju kod D-Arc postupka.
U eksperimentalnom dijelu za čelik kvalitete S355 i debljine 20 mm potrebno je definirati tehnologiju zavarivanja kutnog spoja konvencionalnim MAG te D Arc postupkom uz postizanje potpune penetracije. Provesti odgovarajuća nerazorna i razorna ispitivanja te usporediti dobivene rezultate. Izraditi detaljnu ekonomsku analizu za zadanu vrstu spoja te u konačnici analizirati prikladnost D-Arc postupka za zavarivanje debelostjenih konstrukcija.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
Al	Aluminij
Ar	Argon
C	Ugljik
Cr	Krom
Co	Kobalt
CO_2	Ugljični dioksid
CV	Konstantni napon (engl. Constant Voltage)
D - Arc	Modificirana inačica MAG zavarivanja
Fe	Željezo
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina (engl. Metal Active Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Nb	Niobij
Ni	Nikal
O_2	Kisik
P	Fosfor
RTG	Radiografiski uređaj
S	Sumpor
Si	Silicij
Ta	Tantal
Ti	Titan

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
Q	kJ/cm	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
t	s	Vrijeme
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
$\varnothing_ž$	mm	Promjer žice

SAŽETAK

Ovim radom obrađen je modificirani postupak MAG robotiziranog zavarivanja pod nazivom *D–Arc* i njegova primjena za zavarivanje debelostjenih konstrukcija. Nadalje, objašnjeni su načini prijenosa metala kod konvencionalnih postupaka, kao i kod *D–Arc* postupka koji primjenjuje zakopani električni luk i pripada kategoriji visokoučinskog zavarivanja. Analizirane su pojave u takvoj vrsti luka te je napravljena detaljna analiza pojava koje se javljaju u takvom luku. U radu je navedena sva oprema robotskih stanica.

U eksperimentalnom dijelu napravljena je usporedba postupka *D–Arc* i konvencionalnog MAG zavarivanja. Također, definirana je tehnologija izrade kutnog spoja od osnovnog materijala čelika S355 debljine stijenke od 20 mm. U svrhu detaljnijeg upoznavanja s relativno novom tehnologijom *D–Arc* postupka, napravljena je usporedba procesa izrade kutnog spoja s konvencionalnim MAG postupkom. Analizirani su uvjeti pripreme, uneseni parametri, sam proces zavarivanja i na kraju je napravljena ekonomska analiza te definirana prikladnost *D–Arc* postupka za zavarivanje debelostjenih konstrukcija.

Ključne riječi: MAG, *D–Arc*, visokoučinsko zavarivanje, debelostjene konstrukcije

SUMMARY

This thesis includes research about modified MAG robotic welding procedure called D–Arc and its application for welding thick metal plates and constructions. Further the methods of metal transfers in conventional MAG welding are described as well the buried arc which is applied in D–Arc welding process. D–Arc process belongs to the category of high efficient welding. The phenomenon in the buried arc were also explained in details. Equipment of robotic unit is listed and explained also.

In the experimental part, a comparision between D–Arc and convencional MAG welding was performed. Also, the welding technology of "T" weld with steel S355 as base material with thickness of 20 mm is defined. For a more detailed specifications of the relatively new D–Arc technology a comparison of whole process of creating a "T" weld with MAG process was performed. Parameters such as preparation conditions, input parameters of welding were compared and the economic analysis was performed to determinate applicability of D–Arc process for welding a thick metal plates.

Key words: MAG, D–Arc, high – efficient welding process, thick plates

1. UVOD

Uglavnom se za zavarivanje čeličnih ploča većih debljina stijenki primjenjuje nekoliko postupaka zavarivanja. Najčešće korišteni su elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška, zavarivanje hladnom žicom, metodom uskih prolaza i sl. Svi navedeni postupci koriste se radi ostvarivanja veće količine nataljenog metala, koji znatno utječe na produktivnost i ekonomsku isplativost. Također, jedna od novijih tehnologija je zavarivanje takozvanim zakopanim lukom. Izraz "zakopani luk" često se odnosi na vrstu postupka elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom pod zaštitom plina, gdje je duljina električnog luka relativno kratka, a vrh žice je uglavnom "zakopan" u talini. Uzrok ove pojave je relativno niska vrijednost napona električnog luka što direktno utječe na njegovu duljinu i slična je prijenosu metala kapljicama. Primjenom ovakvog električnog luka ostvarive su velike količine nataljenog metala, koji nam otvara mogućnost jednoprolaznog zavarivanja debelostjenih konstrukcija. U praksi, električni luk se generira iznad taline i zbog toga je kod debljih materijala potrebno višeprolazno zavarivanje. Kod ukopanog luka se električni luk nalazi ispod površine taline i time se može održavati veća penetracija [1].

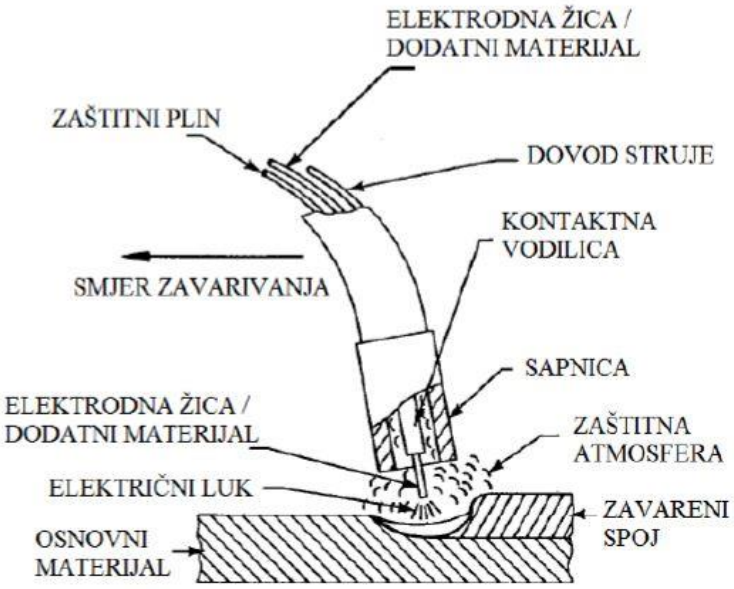
Proteklih godina visokoučinsko zavarivanje je intenzivno istraživano u Japanu i objavljeno je da je u jednom prolazu postignuta maksimalna penetracija od 10 mm. Naknadno je razvijen robotizirani sustav s novim upravljanjem valnim oblikom struje koji omogućuje zavarivanje stabilnim zakopanim lukom na debljinama većim od 10 mm. U ovom radu je predstavljen sustav za zavarivanje *D–Arc* koji koristi zakopani luk te su dani primjeri primjene na različitim oblicima spojeva [2].

2. MAG ZAVARIVANJE

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između metalne elektrodne žice i radnog komada. Cjelokupni proces se odvija u zaštiti aktivnog plina (CO_2 i mješavine). Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni (+) pol istosmjernog izvora i radnog komada u zaštitnoj atmosferi plinova [3].

2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

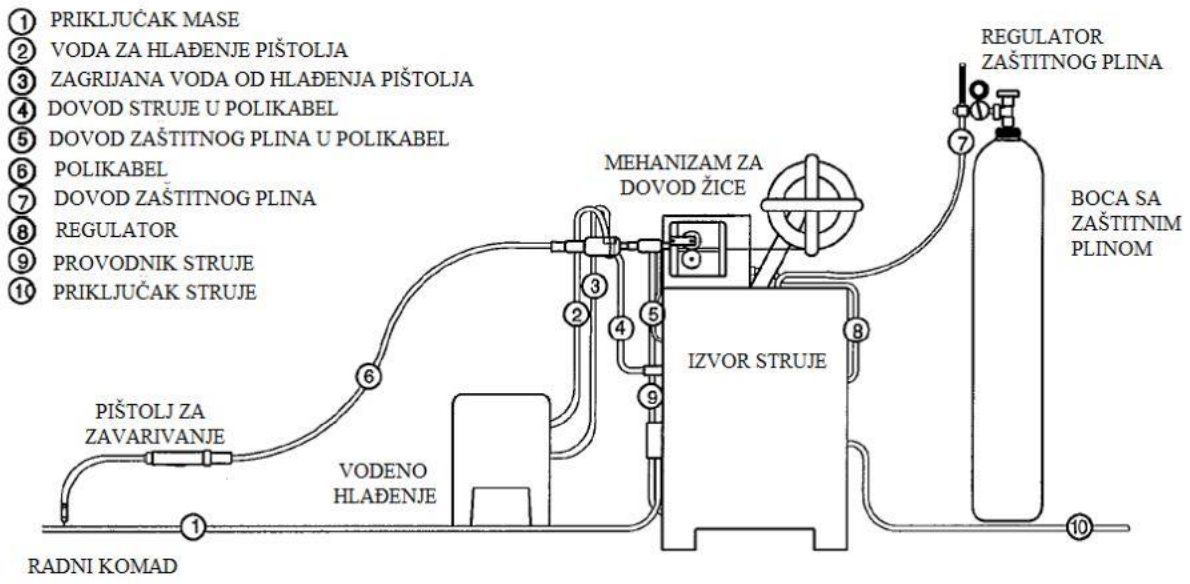
Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku, pod tlakom. Postupak MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Osnovni princip MAG zavarivanja prikazan je na slici 1.



Slika 1. MAG postupak zavarivanja [4]

Osnovnu opremu za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – engl. *Constant Voltage*), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje, te regulator protoka zaštitnog plina prikazani slikom 2. Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je

priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu, te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti) [4].



Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [4]

2.2. Metode prijenosa dodatnog materijala u električnom luku

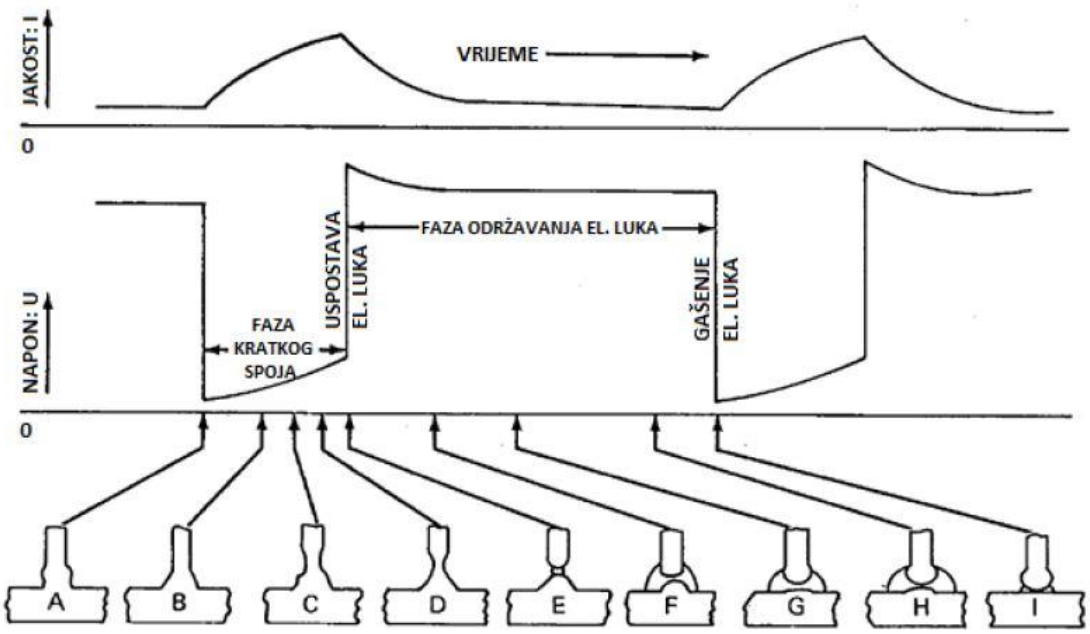
Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku ovisno o jačini narinute struje i napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome, prema gruboj podjeli, razlikujemo područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka te područje rasprskavajućeg luka. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, rasprskavajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv.

waveform control), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas se zahvaljujući razvoju uređaja moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se kontrola procesa provodi u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti tj. primjenom digitalne tehnologije. Ovisno o načinu prijenosa metala se drastično mijenjaju dinamičke karakteristike koje se mogu jednostavno grafički prikazati te dijagramima ukazati na prednosti i nedostatke pojedine karakteristike [5].

2.2.1. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja

Prijenos metala kratkim spojevima se ostvaruje pri malim gustoćama struje i malim naponima, i karakterizira ga niski unos energije. Upotrebljava se za zavarivanje tankih limova i u prisilnim položajima zavarivanja, pri zavarivanju žicama promjera do 1,2 mm uz napon 15 V do 23 V i jakosti struje do 190 A [6].

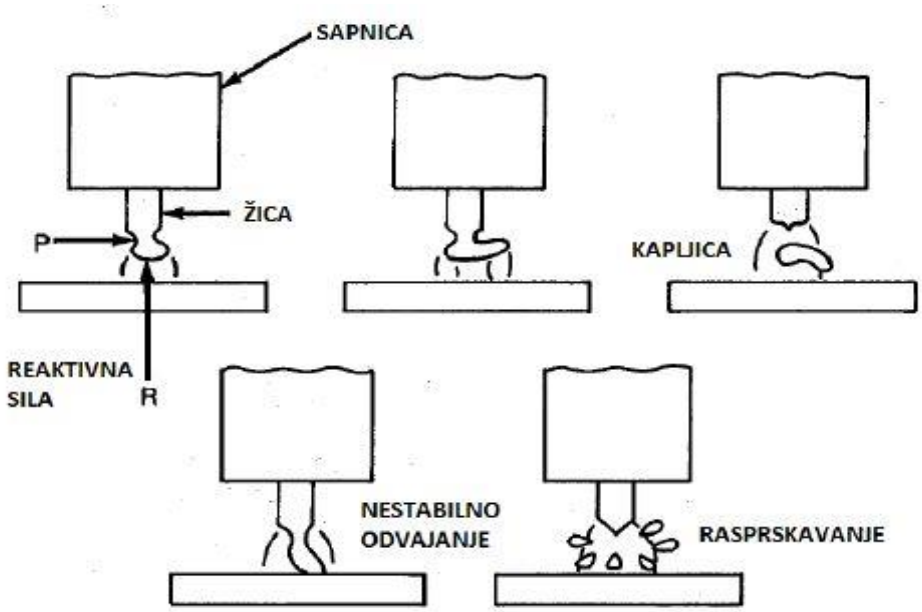
Na slici 3 prikazan je i shematski prikaz pojava. Kada žičana elektroda dotakne radni komad, struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta ograničena je induktivnim otporima kruga. Obzirom da u strujnom krugu otpor ima konačnu vrijednost, napon polagano raste zbog povećanja otpora. Do povećanja otpora dolazi zbog toga što povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt Q =I2 R, sve do taljenja), a s povećanom strujom, povećava se i *pinch* efekt. On dovodi do smanjenja presjeka žice (izazivajući povećani otpor) i konačno do otkidanja zagrijanog vrha žice. Time se kratki spoj prekida i električni luk se ponovno uspostavlja, a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je, opet zbog induktiviteta krugova nešto veći od nominalnog i u toku vremena se smanjuje na nominalnu vrijednost. Treba imati u vidu da se sve ovo zbiva dok se žičana elektroda jednolikom brzinom kreće prema radnom komadu. Dakle, kada žica ponovno premosti razmak nastao otkidanjem njenog vrha, ponavlja se ciklus. Broj ovakvih ciklusa u jednoj sekundi varira u ovisnosti od promjera žice i nametnutih parametara. Pri stabilnim parametrima obično ima između 100 i 200 kratkih spojeva u sekundi [7].



Slika 3. Prijenos metala kratkim spojevima [5]

2.2.2. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom

Pojava prijelaznog električnog luka se zamjećuje pri nižim vrijednostima jakosti struje, ali opet dovoljno visokim da prijenos metala u kratkom spoju učini vrlo nepredvidivim. Tijekom prijelaznog el. luka se preporuča koristiti što inertniji plin (Ar + He) zbog nasilnog odvajanja kapljica koje nepravilnim preletom do rastaljene kupke metala mogu navući neželjene elemente u sam metal zavara. Zavarivanje pomoću prijelaznog el. luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom rasprskavajućeg luka gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno rasprskavaju. Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona struje je el. luk vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara sa radnim komadom, a zbog visokog unosa topline kapljica vrlo intenzivno rasprskava. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visok el. luk koji ne zagrije radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljivanje te nagomilavanje zavara. Unatoč ograničenjima, pronalaženje optimalnog seta parametara u kombinaciji s vještinom zavarivača ovaj proces mogu učiniti industrijski vrlo prikladnim [5]. Na slici 4 prikazane su faze prijenosa metala prijelaznim električnim lukom.

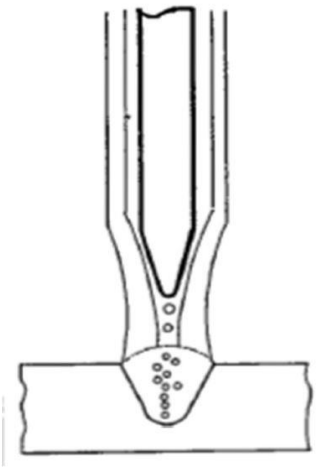


Slika 4. Prikaz faza prijenosa kapljica metala globularnim električnim lukom [7]

2.2.3. Prijenos metala rasprskavajućim električnim lukom

Prijenos metala rasprskavajućim lukom ostvaruje se pri naponima od 25 V do 40 V i jakostima struje zavarivanja od preko 200 A, pri zavarivanju žicama promjera 1,2 mm. Ovim prijenosom postiže se visok učinak taljenja. Prijenos kapi se zbog visoke gustoće struje vrši bez kratkih spojeva. Ova se vrsta električnog luka koristi pri zavarivanju žicama promjera većim od 1,2 mm za popunjavanje žlijeba pri zavarivanju debelih limova, te za zavarivanje debljih materijala [6]. Za ovaj način prijenosa materijala karakteristično je da se prijenos dodatnog materijala s vrha elektrode vrši slobodnim letom malih kapljica kroz atmosferu luka. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom. To znači da sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (manje ili više aksijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Da bi se ostvario ovakav način prijenosa dodatnog materijala potrebna je velika energija. Naime, potrebno je ostvariti velike sile i zagrijavanjem ili na neki drugi način smanjiti sile površinske napetosti koje utječu na veličinu kapljice metala. Kod postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi taljivom elektrodom dosta jasno se može uočiti veličina struje kada nestaju kratki spojevi, to jest kada se ostvaruju uvjeti za prijenos rasprskavajućim lukom. Ta veličina se naziva kritičnom strujom (I_{KR}). I_{KR} je svojstvena za određene zaštitne plinove i njihovim sastavom se može utjecati na njenu veličinu. S obzirom na veliku toplinsku energiju oslobođenu u rasprskavajućem

električnom luku, velikom strujom zavarivanja postiže se velika količina rastaljenog metala, što je povoljno za produktivnost, ali samo u slučaju zavarivanja debljih materijala i to u položenom položaju. U protivnom kod tanjih materijala postoji opasnost prokapljivanja (protaljivanja), a u prisilnim položajima i do cijeđenja velike količine rastaljenog materijala zbog djelovanja sile gravitacije [7]. Slikom 5 prikazan je prijenos dodatnog materijala rasprskavajućim lukom.

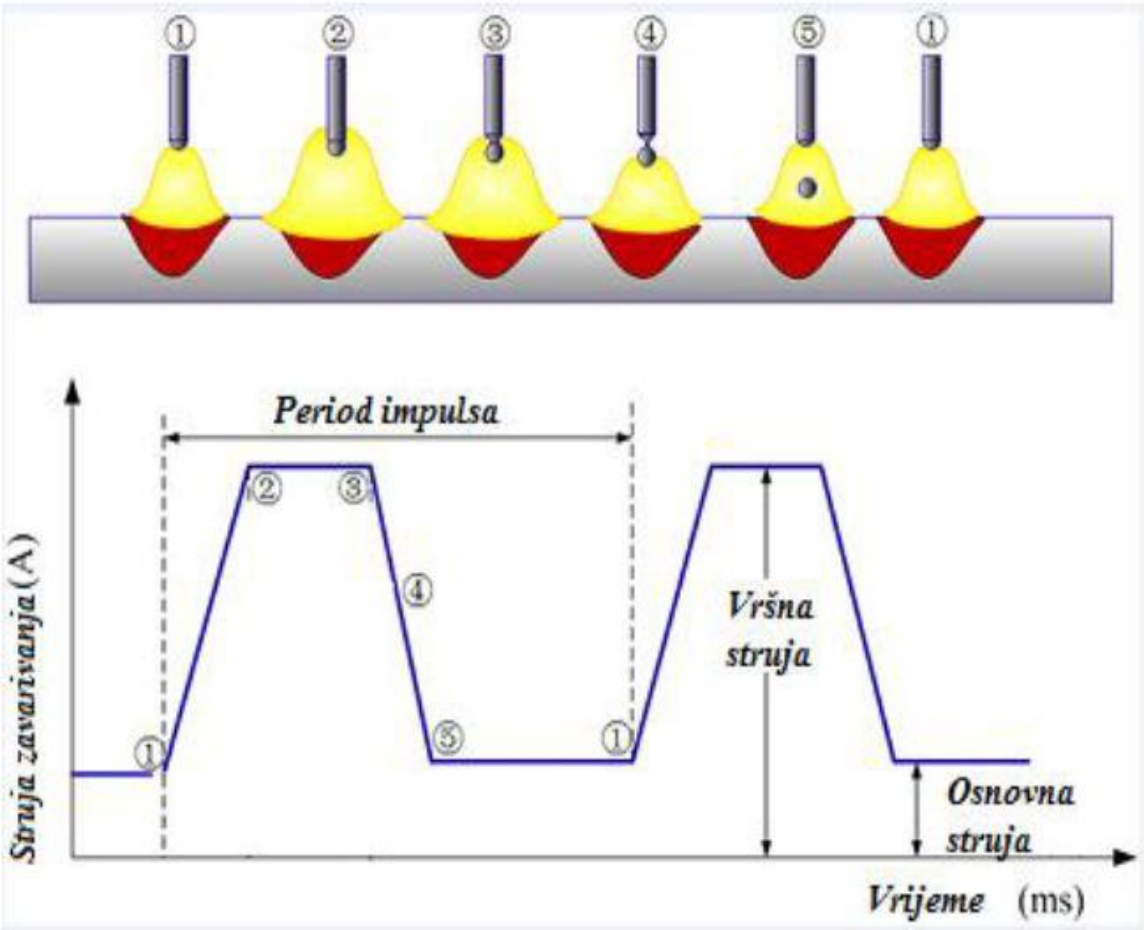


Slika 5. Prijenos dodatnog materijala rasprskavajućim lukom [7]

2.2.4. Prijenos metala impulsnim električnim lukom

Budući da se inače poželjan način prijenosa dodatnog materijala u malim kapljicama ostvaruje tek iznad određenog kritičnog praga (I_{KR}), razvijen je način impulsnog prijenosa dodatnog materijala. Kod ovog načina, prosječna struja zavarivanja manja je od I_{KR} koja bi dala nepravilan i neprihvatljiv prijenos grubim kapima, ali modulira se jačom strujom određene frekvencije, tako da struja varira između neke minimalne vrijednosti nazvane osnovna struja i maksimalne nazvane strujom impulsa. Pri tome osnovna struja ima zadatak da održava električni luk, dok je visina i duljina trajanja impulsa jake struje prilagođena da se premaši I_{KR} i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Impulsi mogu biti sinusnog, trokutastog ili četvrtastog oblika, ali za upravljanje procesom prijenosa materijala povoljniji je četvrtasti oblik. Na slici 6 su prikazani impulsi trapeznog oblika. Na taj način se osigurava prijenos rasprskavajućim lukom pri malim prosječnim vrijednostima struje, tj. pri maloj ukupno unesenoj energiji. Impulsni način prijenosa zadržava prednosti, a otklanja nedostatke koje ima rasprskavajući luk, tj. moguće je primijeniti ga u svim položajima zavarivanja, te za materijale osjetljive na količinu unesene topline. Nadalje jednim promjerom žice moguće je zavariti širi raspon debljina materijala jer je i za deblje žice

moguće namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih limova [7]. Slika 6 prikazuje ciklus prijenosa metala impulsnim lukom s označenim parametrima postupka.

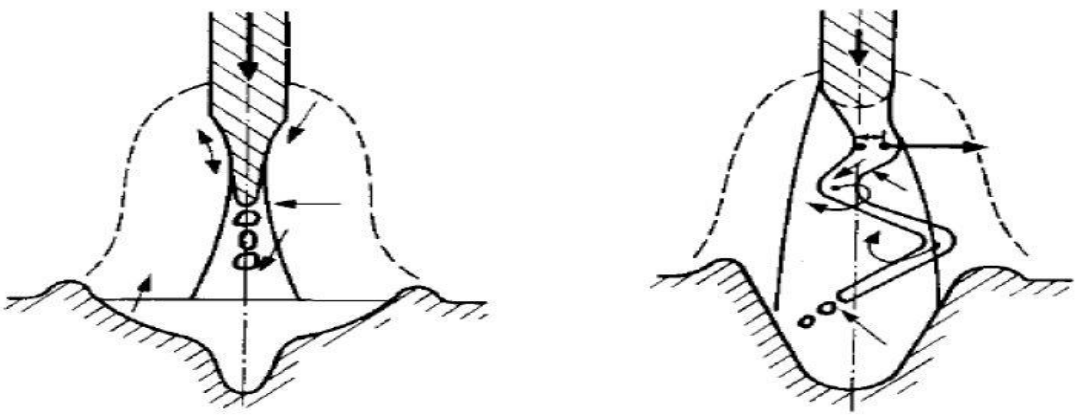


Slika 6. Ciklus prijenosa metala impulsnim električnim lukom [8]

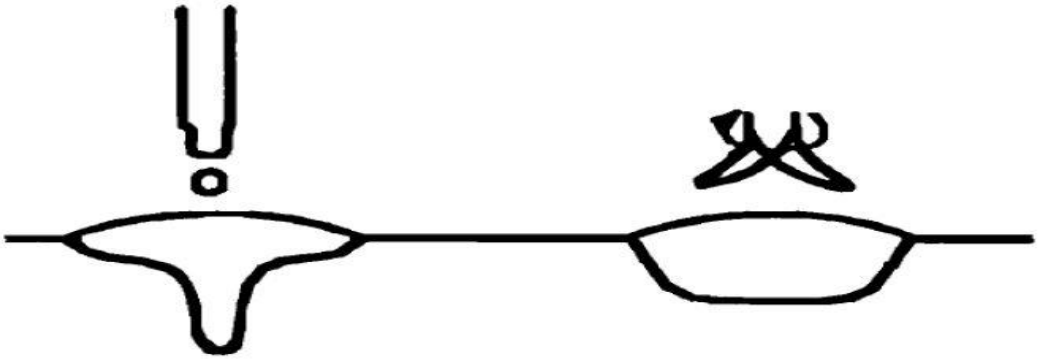
2.2.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom

Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku koji spada u grupu visokoučinskih postupaka MAG zavarivanja. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci MAG zavarivanja koji imaju mogućnost dodavanja jedne ili više žica brzinom većom od 15 m/min. Time se povećava količina nataljenog metala što se može iskoristiti za povećanje volumena zavara ili za povećanje brzine zavarivanja. Rotirajući luk je karakterističan po rotacijskom prijenosu rastaljenog kraja žice. Slika 7 prikazuje shematski prikaz prijenosa metala rasprskavajućim i rotirajućim lukom. Kod rotirajućeg luka vrh žice tali se na osnovu velikog slobodnog kraja žice i velike struje zavarivanja. Uslijed povećanja slobodnog kraja žice, da ne bi došlo do pada struje zavarivanja i slabije penetracije, povećava se brzina dodavanja žice čime se

struja zavarivanja održava konstantnom. Povećanjem struje zavarivanja, na kraju žice, razvija se Jouleova toplina koja tali žicu i bez utjecaja električnog luka. Povećanje topline u slobodnom kraju žice, zbog Jouleovog zakona, raste proporcionalno s njenom dužinom, vremenom i kvadratom struje te se na taj način kod iste struje prirast taljenja dodatnog materijala povećava i za 20 %. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom koriste se plinske mješavine argona uz dodatak kisika kod kojih dolazi do snažnog smanjenja površinske napetosti taline, te se na kraju žice prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice, koji se zatim odvaja u sitne kapljice. Upravo te mješavine plinova potiskuju nestabilan visokoučinski rasprskavajući luk te omogućava izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog rasprskavajućeg luka u rotirajući luk. Radijalna komponenta sile magnetskog polja upravlja rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira. Upravo zbog te rotacije i amplitude električni luk se konusno proširuje, posebno kad je dovoljne dužine. Rastaljeni metal u sitnim kapljicama ulazi u talinu zavara. Rotirajući luk je visoko stabilan električni luk koji zahtijeva duljinu slobodnog kraja žice od 25 mm do 35 mm. Zavari su plosnati i široki. Na slici 8. prikazan je izgled profila zavara dobiven rotirajućim lukom u usporedbi s konvencionalnim rasprskavajućim lukom. Visokoučinsko MAG zavarivanje rotirajućim lukom moguće je postići samo punim žicama i to najčešće promjera 1,0 mm i 1,2 mm. Žice manjeg promjera, zbog manje stabilnosti pri velikim brzinama, nisu pogodne. Rotirajući luk koristi se za zavarivanje materijala srednjih i velikih debljina u proizvodnji i izradi različitih čeličnih konstrukcija u strojogradnji, kotlogradnji i dr. Zavari su pravilnog profila, s dobro protaljenim rubovima što ovaj način prijenosa metala u električnom luku čini pogodnim za dinamički opterećene zavarene spojeve [9,10].



Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala rasprskavajućim i rotirajućim lukom [10]



Slika 8. Usporedba izgleda profila nastalim rasprskavajućim i rotirajućim lukom [10]

2.3. Područje parametara za metode prijenosa metala u električnom luku

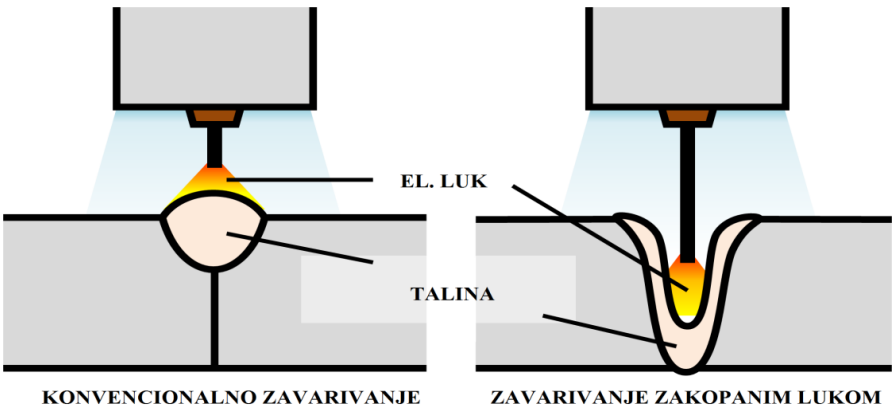
Iz zavarivačkih literatura mogu se izvući rasponi parametara za svaki od pojedinih prijenosa metala, a isti su prikazani tablicom 1.

Tablica 1. Iznosi parametara za pojedine vrste električnog luka [5]

Parametri / El. luk	Jakost struje, A	Napon, V	Promjer žice, mm	Debljina radnog komada, mm
El. luk kratkog spoja	125-175	12-17	0,8-1,2	1-5
Prijelazni el. luk	120-230	17-22	0,8-1,6	>5
Rasprskavajući el. luk	240-500	23-30	1,2-2,4	>7
Impulsni el. luk	80-500	13-30	0,8-2,4	>1
Zakopani (rot.) el. luk	300-750	40-50	1,2	10-20 (jednoprolazno)

3. VISOKOUČINSKO ZAVARIVANJE PRIMJENOM ZAKOPANOG LUKA

Razvoj inverterskih izvora struje za zavarivanje omogućio je nove alternative pri kontroli procesa zavarivanja. Ovim radom predstavljen je stabilizirani zakopani električni luk kao primjer inovativne kontrole procesa zavarivanja te razvoj visokoučinskog zavarivanja čeličnih limova većih debljina. Zakopani električni luk (engl. *burried arc*) je općenito poznat kao jedan od fenomena ponašanja električnog luka te postoje primjeri u zavarivačkoj literaturi [11]. Iako nije precizirana jasna definicija, podrazumijeva se da je to fenomen pri kojem je električni luk zajedno sa vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara kao što je prikazano na slici 9. Vidljivo je, obzirom da je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalan električni luk, kako se može postići veća penetracija, što ovaj modalitet električnog luka čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala. Za zavarivanje debelih limova u praksi se primjenjuju razni postupci poput elektrolučnog zavarivanja pod praškom ili troskom, elektroplinskog zavarivanja, zavarivanja trenjem i sl. Posebno su dobro istraženi zavarivanje laserom te hibridni postupci [12-16]. Drugi visokoučinski postupak je zavarivanje plazmom [17] kojim se može realizirati zavarivanje sučeljenog spoja punom penetracijom u jednom prolazu primjenom tzv. ključanice. Primjena plazme za debele limove je također istražena [18,19]. Svi ovi postupci su vrlo učinkoviti te je moguće ostvariti dobru kvalitetu zavara na debelim materijalima ali imaju puno ograničenja poput položaja i smjera zavarivanja, oblika pripreme i sl.



Slika 9. Razlika između konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom [1]

S druge strane MAG postupak je relativno fleksibilan te se uvodi kada se nabrojani visokoučinski postupci zbog svojih ograničenja ne mogu primijeniti. Međutim, za zavarivanje debelih limova MAG nije dovoljno učinkovit pri čemu se mogu navesti tri glavna razloga:

- potrebno je zavarivanje u više prolaza
- potrebna je velika količina dodatnog materijala (zbog pripreme)
- deformacije komada su jako velike.

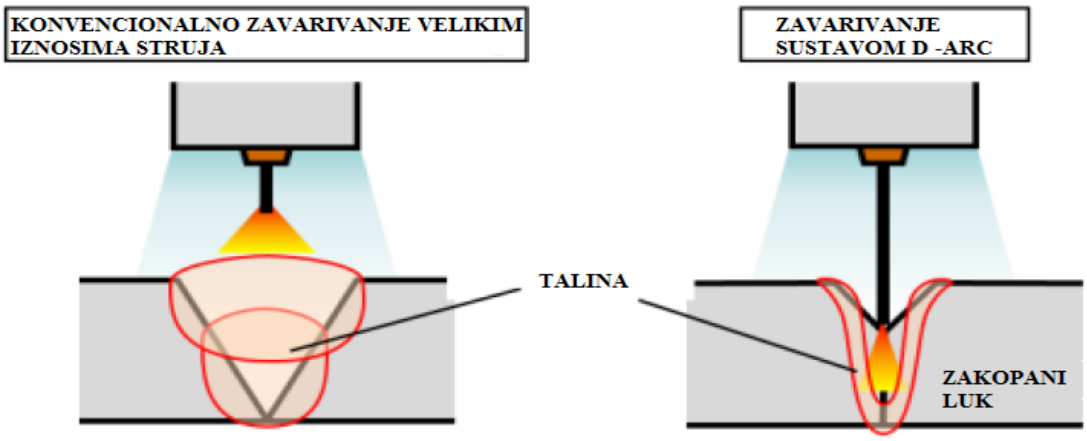
Kao učinkovito rješenje navodi se povećanje količine nataljenog metala po prolazu ili smanjenje kuta otvora žlijeba [20]. Međutim, i dalje ostaje problem plitke penetracije zbog čega priprema mora biti po čitavoj debljini materijala uz povećani kut otvora žlijeba. To rezultira povećanom potrošnjom žice te posljedično i većim deformacijama. Svi ovi nedostaci mogu se eliminirati primjenom zakopanog luka u MAG postupku uz postizanje učinkovitog procesa i kvalitetnog zavarenog spoja (slika 10). Međutim, zakopani luk je podložan nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva tako da je stabilizacija samog procesa vrlo zahtjevna posebno u području jakih struja. Iz tog razloga i ograničenja u primjeni zakopani luk nije u prošlosti često upotrebljavan u proizvodnji. U posljednje vrijeme načinjena su istraživanja na području tehnika stabilizacije zakopanog luka pri struji od 300A i jednoprolaznom zavarivanju na limu debljine 10 mm [22,23]. Također, provedena su istraživanja na stabilizaciji zakopanog luka pri struji višoj od 500 A te većim debljinama pa je razvijen visokoučinkoviti sustav nazvan *D-Arc*.

a) b)

Slika 10. Prikaz zakopanog luka: a) pogled izvana; b) prikaz procesa iznutra [21]

Pri MAG zavarivanju čelika jakim strujama u zaštiti sa 100% CO_2, smanjivanjem napona električnog luka snižava se i visina luka, tako da površina rastaljenog metala ispod luka postaje iskrivljena. Posljedično, električni luk se uspostavlja u nižem području ispod površine rastaljenog metala okružen svojevrsnim zidom taline. Pri ovakvom načinu prijenosa metala rasprskavanje je izuzetno nisko čak i pri jakim strujama [2].

Posljedično je i priprema spoja na debljim materijalima jednostavnija i kraća kod primjene zakopanog luka nego kod višeprolaznog zavarivanja. Budući da je pripremljeni spoj manjih dimenzija , potrošnja žice je također manja. Na slici 11 prikazana je razlika pripreme spoja između konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom (sustavom *D-Arc*).



Slika 11. Razlika u pripremi spoja [1]

U postupcima višeprolaznog zavarivanja potrebno je više dodatnog materijala, što uzrokuje veće troškove. Višeprolaznim zavarivanjem na širem pripremljenom spoju postiže se veća količina nataljenog metala s nižim vrijednostima unosa topline što pogoduje mikrostrukturi zavara i zone utjecaja topline, ali s druge strane mogu se pojaviti veća zaostala naprezanja i deformacije prilikom zavarivanja [1].

3.1. Praktični primjer zakopanog električnog luka pri jakoj struji

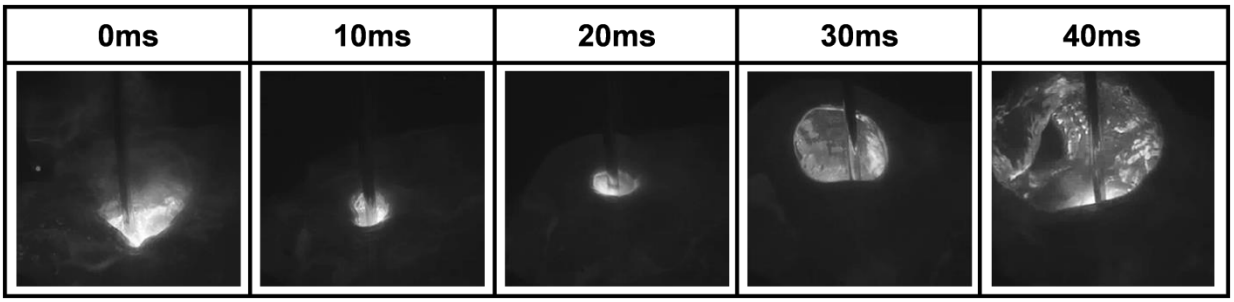
Otvaranje šupljine unutar rastaljenog metala (nazvanog zakopani prostor) je prilično nestabilno i pokazuje intenzivno gibanje taline. Pretpostavlja se da je uzrok ovakvog ponašanja u ponavljajućem ciklusu kako slijedi:

- rastaljeni metal na bočnom zidu zakopanog prostora se približava žici
- da bi se održala duljina luka dolazi do porasta struje
- sile u luku rastu u dubljem dijelu taline te dolazi do brzog širenja otvora.

Drugim riječima, smatra se da zakopani luk postaje nestabilan u području visoke struje ako nema odgovarajućeg tlaka na rastaljeni metal bočnog zida zakopanog prostora što je posebno naglašeno blizu površine taline [24].

3.1.1. Promatranje zakopanog luka

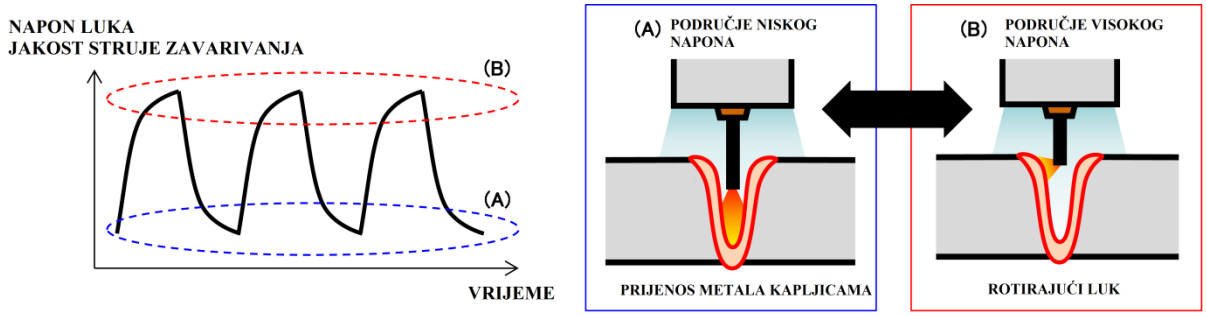
Nagib karakteristike za promatranje zakopanog luka je postavljen na vrijednost -1 V/100 A što odgovara uobičajenim vrijednostima izvora struja za MAG zavarivanje. Slika 12 prikazuje snimke navarivanja na ploču dobivene visokobrzinskom kamerom pri brzini žice 40 m/min, struji zavarivanja 570 A te naponu od 48 V, pri čemu je korišten izvor struje sa ravnom karakteristikom (CV). Svaki kadar predstavlja interval od 10 ms. Kao što je prikazano na slici 12. Zakopani električni luk ispod površine taline zabilježen je jedino u trenutku 0 ms te nije bio stabilan iako se konstantno održavao. Veličina otvora na površini taline konstantno se mijenja te čak dolazi i do zatvaranja uz pojavu kratkih spojeva uz intenzivno rasprskavanje metala i posljedično nepravilan izgled zavarenog spoja. Električni luk promatran je sustavom za snimanje na osnovi X-zraka te visokobrzinskom video kamerom. Osnovni materijal primjenjen u eksperimentu je niskougljični čelik, promjer odgovarajuće žice 1.2 mm, zaštitni plin 100% CO_2 uz brzinu zavarivanja od 30 cm/min [2].



Slika 12. Rezultati snimanja nestabilnog zakopanog luka [2]

3.1.2. Stabilizacija i analiza zakopanog luka

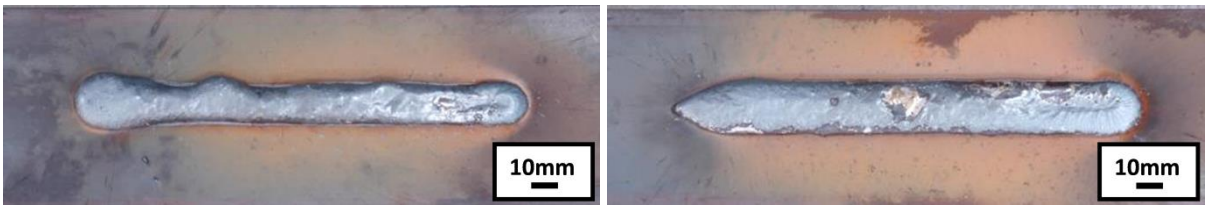
U cilju stabilizacije zakopanog električnog luka razvijen je valni oblik struje prikazan slikom 13 koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti struje i napona. Takav valni oblik je u biti niskofrekventno modulirana kontrola napona kojim se periodično mijenja oblik izlaznog napona [24].



a) b)

Slika 13. Mehanizam stabilizacije zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona: a) prikaz valnog oblika struje i iznosa napona; b) shematski prikaz ponašanja luka [21]

Slika 13 (a) prikazuje valni oblik struje i napona pri niskofrekventno moduliranoj kontroli napona. Namješteni napon se mijenja frekvencijom 100 Hz pri čemu se isto mijenja i struja ovisno o opterećenju na sekundarnoj strani izvora struje za zavarivanje. Slika 13 (b) prikazuje ponašanje luka označeno isprekidanom linijom (A) i (B) na slici 13 (a). Isprekidana linija (A) prikazuje područje niskog, a linija (B) visokog napona. U području (A) žica je postavljena dublje u talinu pri čemu se tali dno šupljine a prijenos metala je u obliku kapljice. S druge strane, u području (B), vrh elektrode je postavljen relativno pliće pri čemu se luk uspostavlja na zidove šupljine. Rastaljeni metal na zidnoj stijenci zakopanog prostora je potisnut od strane luka pri čemu se održava rotirajući luk. Kombinacijom ova dva načina rada (slika 14.) ponašanje luka i taline se stabilizira [21].

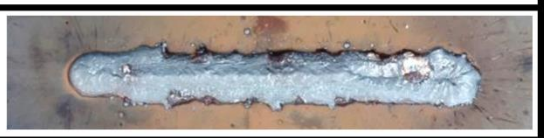


a) b)

Slika 14. Usporedba izgleda zavara: a) konvecionalni zakopani luk; b) s primjenom niskofrekventne modulirane kontrole napona [21]

Kako bi se postigao stabilniji električni luk i bolji izgled zavara modificiran je nagib karakteristike kako slijedi; -2 V/100 A, -10 V/100 A, -20 V/100A uz brzinu dodavanja žice 40 m/min, struju zavarivanja 570 A i napon zavarivanja 48 V. Ovi rezultati su prikazani na slici 15. U slučaju nagiba karakteristike od -2 V/100 A , što se može okarakterizirati kao blago padajuća karakteristika izgled navara je nepravilan i relativno širok. Smatra se da je zakopani luk

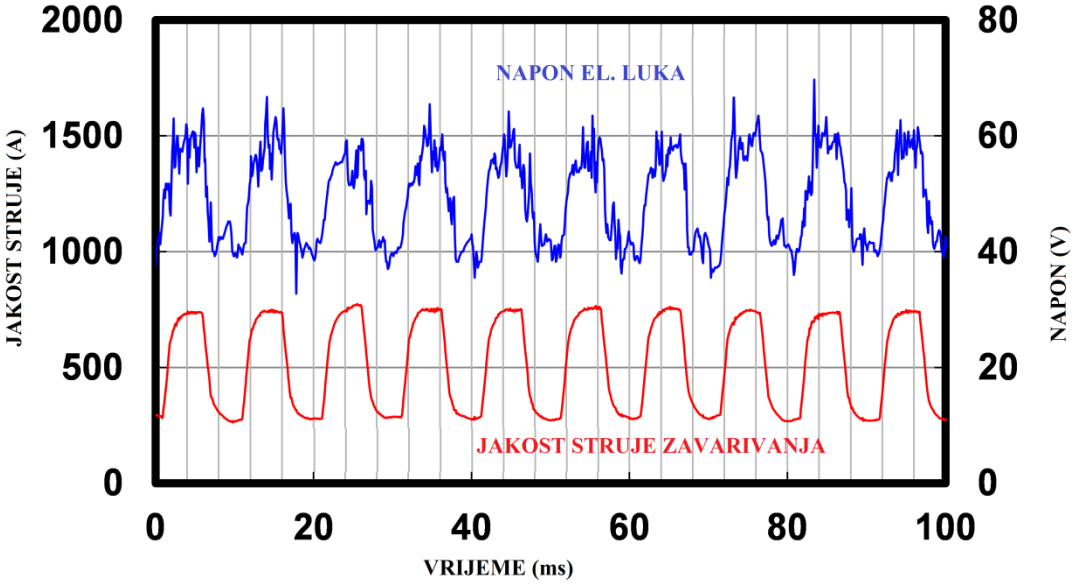
vrlo nestabilan te je talina plitka i zato se otvara uz površinu osnovnog metala s obzirom da je trenutna promjena struje prevelika uz promjenu napona. U slučaju nagiba -20 V / 100 A, što se može smatrati strmo padajućom karakteristikom, izgled navara je nepravilan iako se smatra da je zakopani luk relativno stabilan. Međutim, veliki poremećaj ima utjecaj kratkog spoja obzirom da je trenutna promjena struje mala uz promjenu napona. Posljedično se smatra da će se uz nagib -10 V / 100 A postići odgovarajući gradijent vanjske karakteristike kako bi se stabilizirao zakopani električni luk pri jakim strujama obzirom da je promjena veličine navara relativno mala uz česte nepravilnosti [2].

PARAMETRI ZAVARIVANJA		Vanjska karakteristika	Izgled navara 30mm
Brzina dodavanja žice: 40m/min Prosječna jakost struje: 570 A Prosječni iznos napona: 48V	(1)	-2V/100A	
	(2)	-10V/100A	
	(3)	-20V/100A	

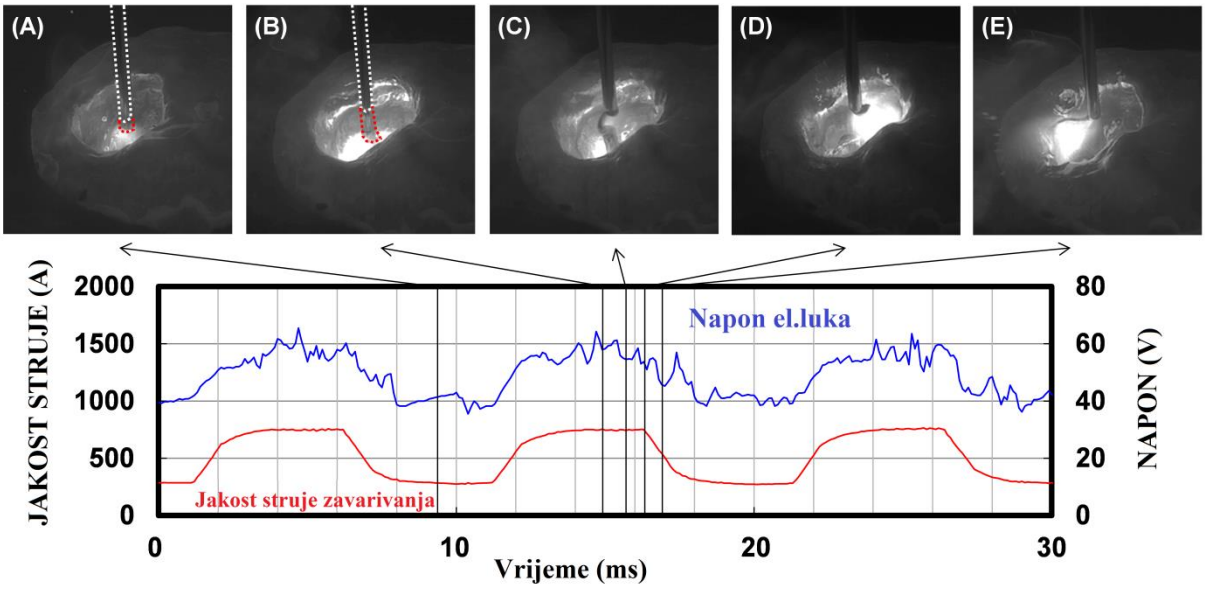
Slika 15. Utjecaj nagiba vanjske karakteristike na izgled navara [2]

3.1.3. Modulirana kontrola napona niskom frekvencijom

Kako bi se poboljšao izgled navara načinjenog zakopanim lukom primijenjena je niskofrekventna modulirana kontrola napona. Valni oblik struje kontroliran je moduliranim naponom konstantne frekvencije kako bi se izmjenjivao prijenos metala kapljicom i njihanjem. Na slici 16 prikazan je valni oblik struje i napona dobivenog ovakvim načinom upravljanja i kontrole. Kako bi se detaljnije istražio utjecaj niskofrekventnog moduliranog naponskog upravljanja visokobrzinskom kamerom je snimljen process pri brzini žice od 40 m/min, struji zavarivanja od 570 A te podešenom naponu od 48 V ± 10 V, nagibom vanjske karakteristike -10 V / 100 A te frekvnecijom od 100 Hz. Rezultati snimanja prikazani su na slici 17.



Slika 16. Valni oblik pri moduliranom upravljanju naponom niske frekvencije [2]



Slika 17. Fenomen stabiliziranog zakopanog luka pri moduliranom upravljanju naponom niske frekvencije [2]

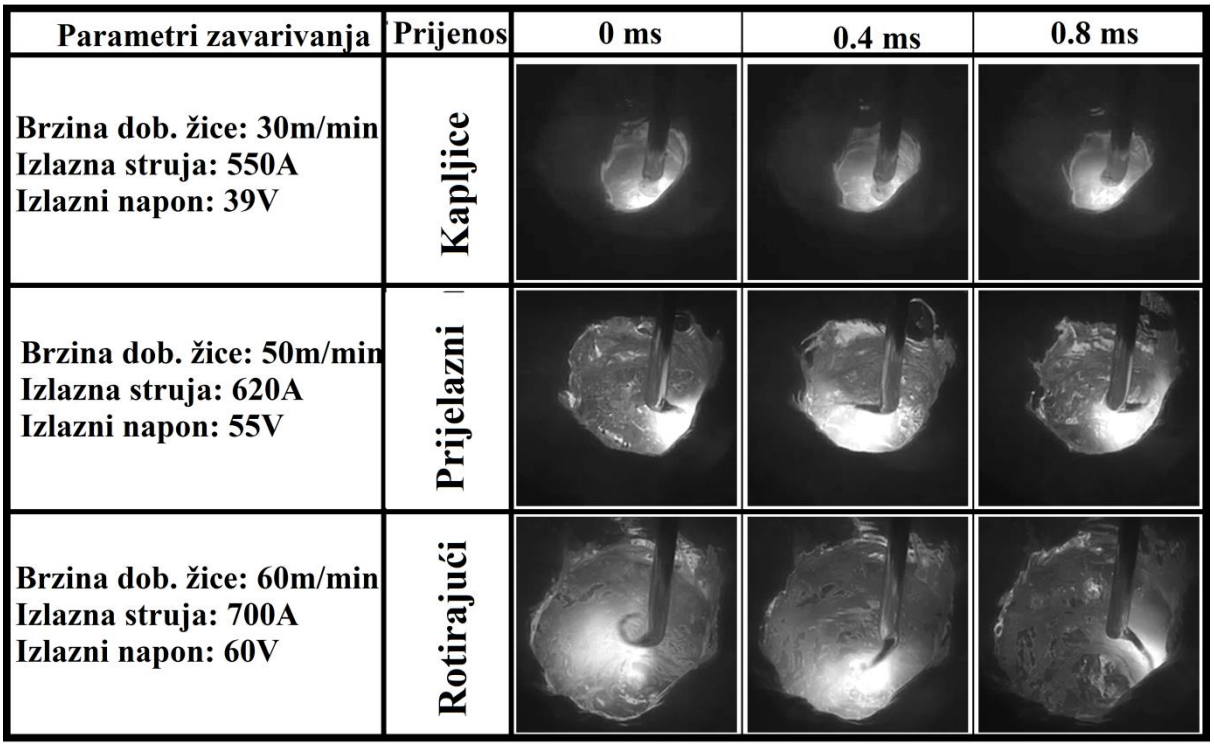
Trenutak (A) prikazuje prijenos metala kapljicama pri struji od 300 A i niskom naponu. Tijekom vremena upravljačka faza aktivira područje višeg napona. Trenutak (B) prikazuje kako se položaj vrha elektrode pomiče prema gore zbog povećane brzine taljenja. Stupac rastaljenog metala se formira na vrhu elektrode, luk se naglo širi te tlak potiskuje dno šupljine zakopanog luka.

Trenutak (C) prikazuje nestabilan stup rastaljenog metala na početku rotacije dok trenutak (D) prikazuje završnu fazu perioda velike struje koja predstavlja i završetak višeg područja napona. Mala kapljica se odvaja u talinu i rotirajući luk se zatvara prema zidu taline u šupljini zakopanog luka. Smatra se da tlak plazme luka pridržava zid i održava dovoljan otvor na površini taline sprječavajući njegovo smanjivanje i zatvaranje u konačnici. Trenutak (E) prikazuje prijelazno stanje od područja višeg napona do područja nižeg napona. Veličina električnog luka se smanjuje zajedno sa smanjenjem struje te se snižava položaj vrha žice. Ovakvo ponašanje luka je periodički ponavljajuće i stabilno; stabilan zakopani luk sa dubokom penetracijom je reliziran i to bez velikog rasprskavanja.

3.1.4. Tri načina prijenosa metala zakopanim lukom u rasponu velikih jakosti struja

Kako bi se razjasnilo ponašanje električnog luka na različitim razinama struje pomoću visoko brzinske kamere analiziran je relativno stabilan zakopani luk pri nagibu vanjske karakteristike od -10 V / 100 A. Slika 18 pokazuje snimke pri brzini dovođenja žice od 30, 50 i 60 m / min. U slučaju brzine dovođenja žice od 30 m / min uz jakost struje od 450 A i napon od 39 V moguće je vidjeti vrh žice zbog stabilnog otvora u rastaljenom metalu iako se radi o minimalnoj vrijednosti u eksperimentalnim uvjetima. Razaznaje se prijenos kapljicama pri čemu se kapljica na vrhu žice odvaja na dno šupljine zakopanog luka omeđenog talinom pri čemu rasprskavanje nije zabilježeno. U slučaju brzine žice od 60 m / min uz jakost struje od 700 A i napon od 65 V veličina otvora postaje maksimalna u eksperimentalnim uvjetima te se javlja rotirajući luk. Stup rastaljenog metala se stvara na vrhu žice te povremeno odvaja velikom brzinom rotacije uz intenzivno rasprskavanje [25].

Na slici 18. se uz vremenski interval kadra od 0,4 ms jasno vidi visokobrzinska rotacija. Za brzinu žice od 50 m / min uz jakost struje od 620 A i napon od 55 V javlja se svojevrsni prijelazni način prijenosa metala. Na vrhu žice se stvara stup rastaljenog metala kao i pri rotirajućem luku, no međutim ponaša se kao njihalo koje rotira visokom brzinom. Treba napomenuti da je ovaj modalitet prijenosa vrlo sličan njihajućem rasprskavajućem luku kod MAG zavarivanja te se zbog toga u ovom radu naziva njihalo tj. prijelazni luk između prijenosa kapljicama i rotirajućeg luka [26].



Slika 18. Tri načina prijenosa metala u zakopanom luku pri visokim strujama [2]

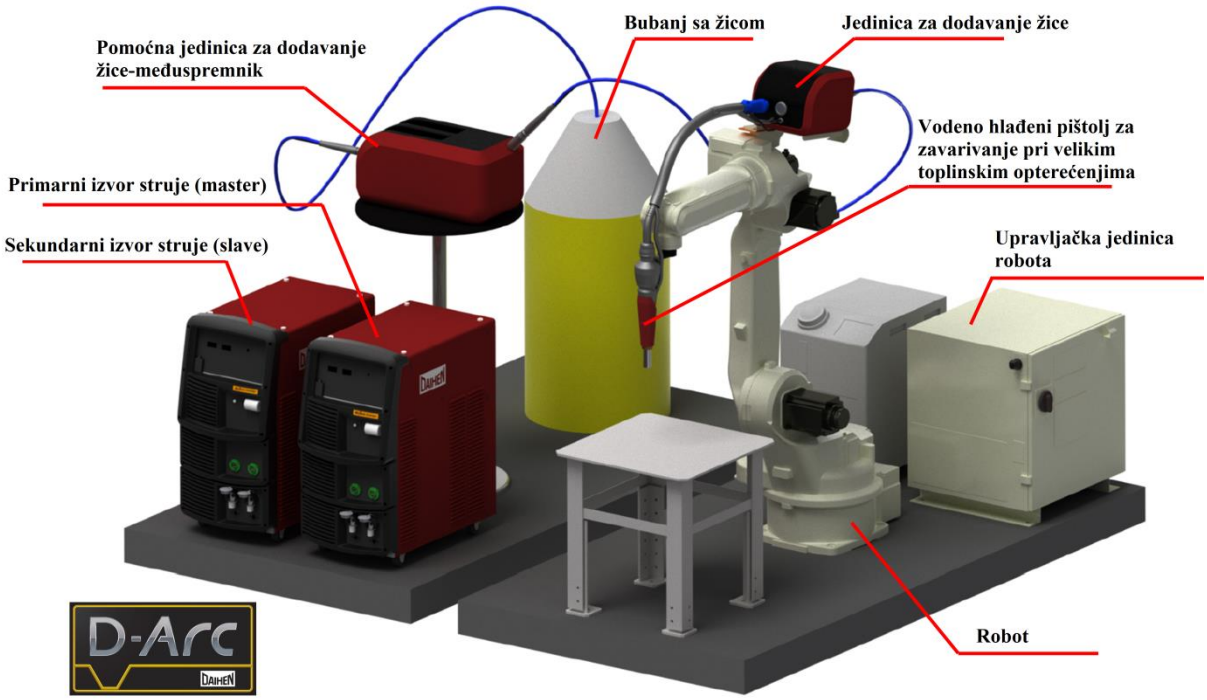
Posljedično moguće je izdvojiti tri načina prijenosa metala pri strujama većim od 450 A s dva prijelazna stanja. Jedno prijelazno stanje je mješavina prijenosa kapljicama i njihanjem dok je drugo prijelazno stanje između njihanja i rotirajućeg luka. Modaliteti prijenosa metala pri zakopanom luku su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Modaliteti prijenosa metala pri zakopanom luku [2]

Način prijenosa metala	*Smjer luka u šupljini*	*Rasprkavanje kapljica*
Kapljicom	Dno	Nema (malo)
Njihanjem	Dno i zid	Relativno malo
Rotacijom	Zid	Jako

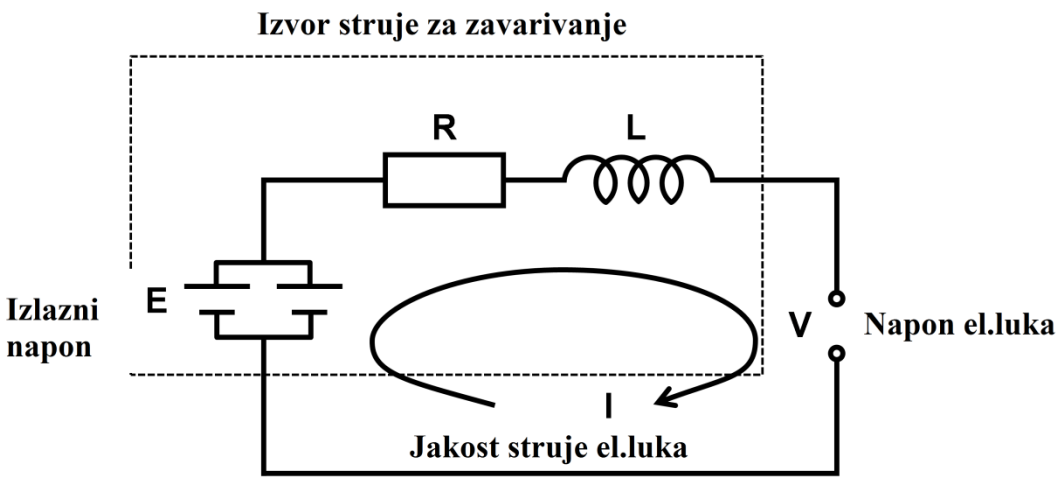
3.2. Razvoj *D-Arc* sustava za zavarivanje zakopanim lukom visokim strujama

Na temelju informacija i znanja iz opisanog istraživanja u prethodnom poglavlju razvijen je robotizirani sustav *D-Arc* prikazan na slici 19. Sustav uz robot čine dva izvora struje za zavarivanje koji maksimalno mogu isporučiti struju do 1000 A pri čemu je na glavni izvor struje spojeno modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske karakteristike. Dodavač žice s maksimalnom brzinom dodavanja žice od 100 m/min je smješten na tijelu robota i spojen zajedno sa međuspremnikom žice. Pištolj za zavarivanje je hlađen vodom i izrađen aditivnom 3D tehnologijom na bazi bakrene legure te je moguće opterećenje od 650 A pri 100 % intermitenciji [21].

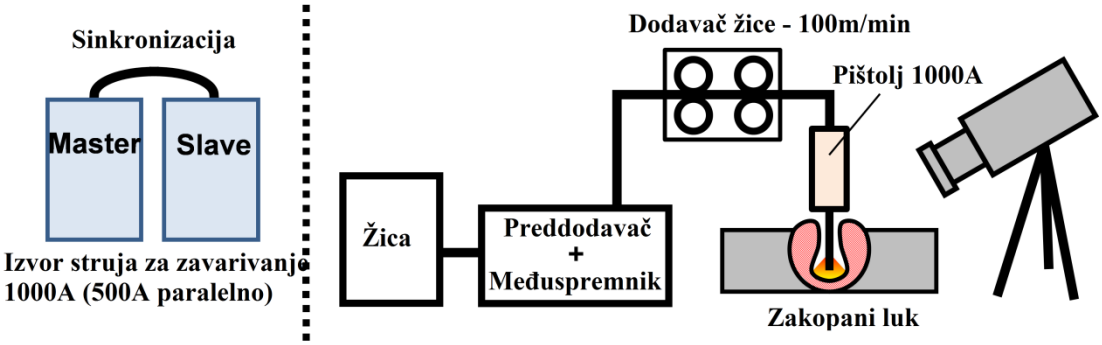


Slika 19. Konfiguracija visokoučinkovitog robotiziranog sustava zavarivanja *D-Arc* [21]

Izvor struje se sastoji od dva digitalna inverterski upravljana izvora s ravnom karakteristikom koji su međusobno spojeni serijskim kabelom te je moguće sinkronizirano upravljati izlaznim valnim oblikom struje koji se može prikazati ekvivalentnom električnom shemom prikazanom na slici 20, dok je na slici 21 prikazan shematski prikaz *D-Arc* sustava za zavarivanje [2].



Slika 20. Ekvivalentni prikaz električnog kruga izvora struje za zavarivanje [2]

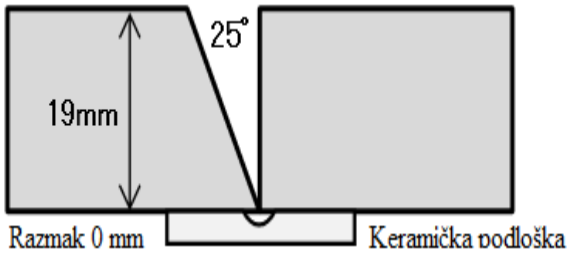


Slika 21. Shematski prikaz *D-Arc* sustava [2]

3.2.1. Primjeri primjene sustava D-Arc

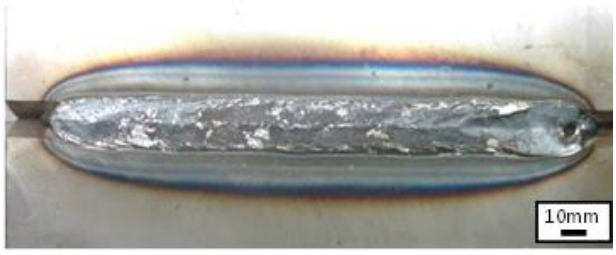
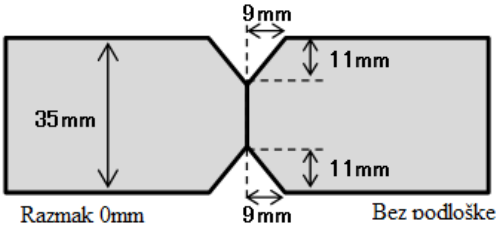
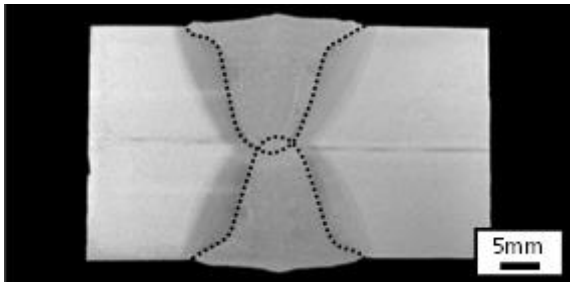
Primjeri zavarenih spojeva načinjenih sustavom *D-Arc* prikazani su na tablicama 3, 4 i 5. Tablica 3 prikazuje primjer zavarivanja sučeljenog spoja debljine 19 mm i otvorom žlijeba 25 mm bez razmaka na keramičku podlogu. Postignut je dobar izgled zavara sa strane lica i korijena.

Tablica 3. Primjer sučeljenog zavara debljine 19 mm uz primjenu keramičke podloške [21]

Struja zavarivanja: 580 A, Napon el. luka: 48V, Brzina zavarivanja: 24 cm / min Promjer žice: $\varnothing_{ž}$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

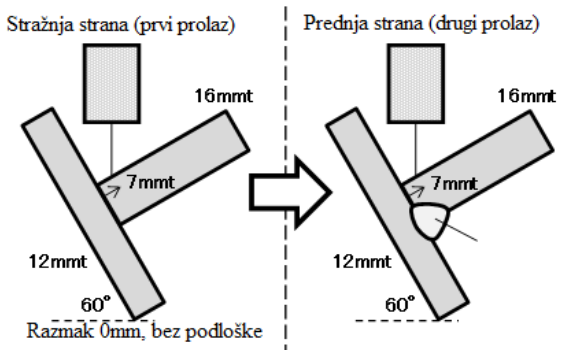
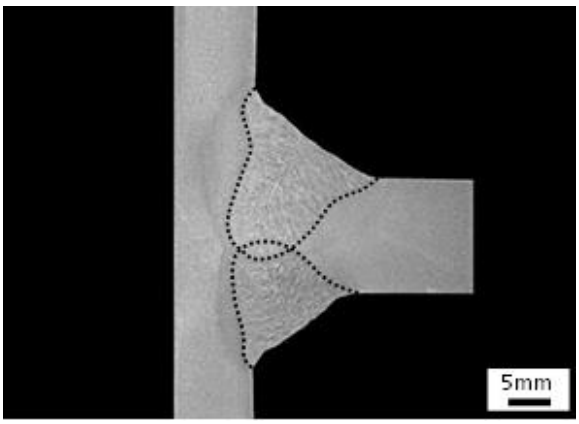
Tablica 4. prikazuje primjer zavarivanja sučeljenog spoja debljine 35mm uz X-pripremu i visinu grla žlijeba 13 mm. Zavarivanje je provedeno obostrano u vodoravnom položaju. Obzirom de je primijenjena veća visina grla žlijeba moguća je veća penetracija bez opasnosti od protaljivanja te je izbjegnuta primjena podloške.

Tablica 4. Primjer sučeljenog spoja na limu debljine 35mm uz X pripremu [21]

Struja zavarivanja: 620 A, Napon el. luka: 47 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min Promjer žice: $\varnothing_{ž}$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

Tablica 5 prikazuje primjer pune pentercije na T spoju bez dodatne pripreme i bez razmaka. Zavarivanje je provedeno s obje strane u vodoravnom položaju uz okretanje radnog komada. Uz ovakvu pripremu izbjegnut je rizik od protaljivanja.

Tablica 5. Primjer kutnog spoja na limu debljine 16mm [21]

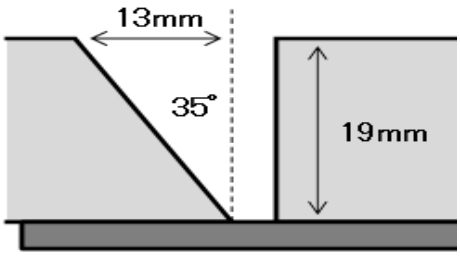
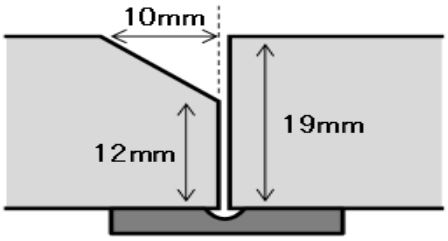
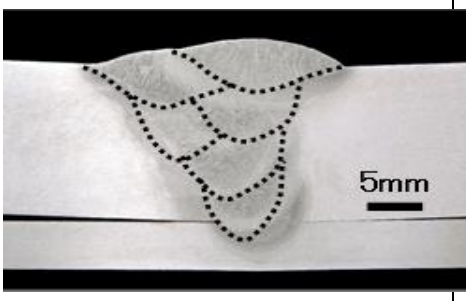
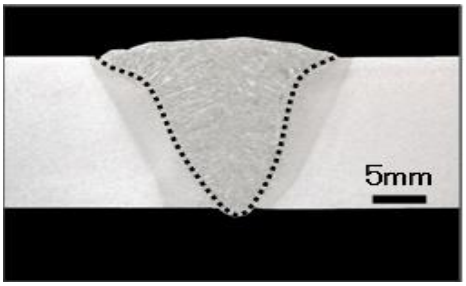
I PROLAZ: Struja zavarivanja: 440 A, Napon luka: 38 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min **II PROLAZ**: Struja zavarivanja: 530 A, Napon luka: 43 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min Promjer žice: $\varnothing_{ž}$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled I strane kutnog zavara	Priprema spoja
	
Izgled II strane kutnog zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

Ovi primjeri pokazuju da je primjena sustava *D-Arc* raznolika i za očekivati je u budućnosti proširenje vrsta i oblika spojeva.

3.2.2. Usporedba zavarenih spojeva načinjenih sustavom D-Arc i konvencionalnim MAG postupkom

U tablici 6 prikazana je usporedba sučeljenog zavara debljine 19 mm načinjenog primjenom sustava *D-Arc* i konvencionalnog MAG zavarivanja u više prolaza.

Tablica 6. Usporedba zavara načinjenih konvencionalnom i *D-Arc* tehnologijom [21]

	Konvencionalno	*D-Arc*
Parametri	Struja zavarivanja: 300 A Napon luka: 30 V Brzina zav.: v_{zav}=30 cm / min Promjer žice:$\varnothing_{ž}$=1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	Struja zavarivanja: 620 A Napon luka: 44 V Brzina zav.: v_{zav}=30 cm / min Promjer žice:$\varnothing_{ž}$=1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)
Priprema spoja	 Razmak 1mm, podloška od čelika	 Razmak 1mm, bakrena podloška
Makroizbrusak (presjek)		
Broj prolaza	6	1
Površina žlijeba [mm^2]	123,5	38,5
Kutna deformacija	7°	1°

Dodatni materijal je puna žica debljine 1,4 mm klasificirana kao JIS YGW11 (AWS ER 70-S, EN G 42 3 C G0). Pri konvencionalnom MAG zavarivanju potrebno je 6 prolaza dok se sustavom *D-Arc* postiže puna penetracija u samo jednom prolazu što dokazuje višestruku učinkovitost. Otvor žlijeba od 35° sa visinom grla žlijeba od 0 mm primijenjen za *D-Arc* baziran je na standardima JARAS 1012 (WES 8703):2004 i JARAS 1013(WES8704):2004. Površina žlijeba smanjena iz 123,5 mm^2 na 38,5 mm^2 što odgovara jednoj trećini konvencionalne pripreme. Kutna deformacija kod sustava *D-Arc* smanjena je sa 7° na 1° što čini samo 1/7 u odnosu na klasičnu pripremu. Dodatno, mehanička svojstva spoja su dobra što potvrđuje kvalitetu zavara uz visoku učinkovitost [14,27].

3.3. Osnovni materijal-čelik S355

Čelik S355 (Werkstoffnummer 1.0549) spada u opće konstrukcijske čelike za široku upotrebu uz odličnu zavarljivost te se često koristi zbog boljih mehaničkih svojstava s obzirom na konvencionalno upotrebljavan čelik S255. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima u širokom spektru debljina, ovisno o eksploatacijskim svojstvima. Široko se upotrebljava u građevinskoj, proizvodnoj, brodograđevinskoj i *off-shore* industriji zbog niske cijene i široke dostupnosti. Toplinska obrada u svrhu očvrsnuća čelika S355 nije preporučljiva, ali je u ograničenim mogućnostima dozvoljena. U slučaju da se toplinska obrada provodi, faktori poput vršne temperature, brzine zagrijavanja i hlađenja te vremena držanja ovise o obliku, veličini i debljini profila. Generalne preporuke za toplinsku obradu normalizacije je zagrijavanje na temperaturu 20 °C do 50 °C iznad temperature Ac3 (911 °C) te držanja 3 min/1 mm debljine. Očekivano poboljšanje mehaničkih svojstava je povećanje žilavosti i čvrstoće materijala uz eliminaciju segregacija u obliku dendritnih zrna unutar mikrostrukture. Oznaka u sufiksu: N označava da je čelik S355NL prošao toplinsku obradu normalizacije, a oznaka L označava da je čelik pogodan za eksploataciju pri niskim temperaturama do -50 °C. Zavarljivost ovog čelika ne ovisi bitno o obliku, dimenzijama i debljini radnog komada te nije osobito osjetljiv na nečistoće u mikrostrukturnom sastavu [28].

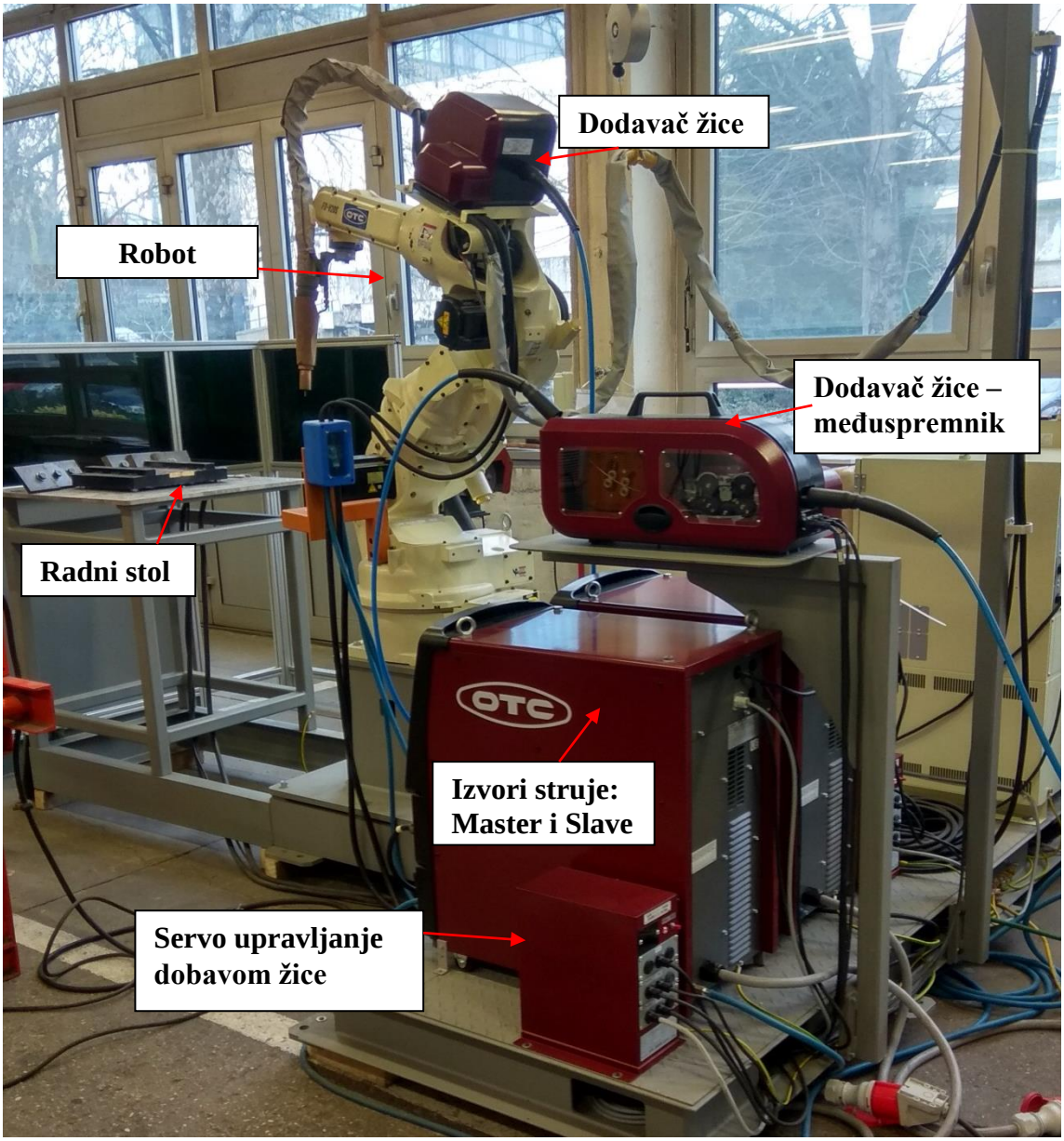
4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Na samom početku, oblikovan je koncept izvedbe eksperimenta koji se sastojao od zavarivanja kutnog spoja novom tehnologijom i sustavom *D–Arc* te usporedbe istog spoja napravljenog konvencionalnim MAG zavarivanjem. U oba slučaja zavarivanje je bilo robotizirano tako da će krajnji rezultati i analize biti usporedivi. Uzorci korišteni pri samom zavarivanju bili su limovi, odnosno ploče debljine 20 mm izrađene od čelika S355. Kod zavarivanja *D–Arc* sustavom priprema spoja je podrazumijevala samo čišćenje površine i pripojene krajeve budući da se radi o jednoprolaznom zavarivanju, dok se kod konvencionalnog MAG zavarivanja izrađivala K priprema spoja. K priprema napravljena je plinskim rezanjem i naknadnim brušenjem.

Nakon zavarivanja uzorci su podvrgnuti radiografskom ispitivanju kako bi se utvrdila kvaliteta spoja, odnosno prisutnost uključaka, pora, pukotina i sl. Završni dio eksperimenta uključuje izrezivanje makroizbruska, fino brušenje i nagrizanje otopinom kako bi se dobio kontrast između slojeva osnovnog materijala, ZUT – a i materijala zavara. Makroizbrusci su analizirani pod mikroskopom i mjerena je tvrdoća u različitim zonama na tvrdomjeru prema Vickers skali.

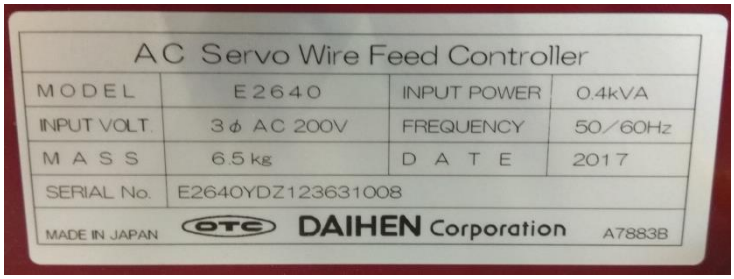
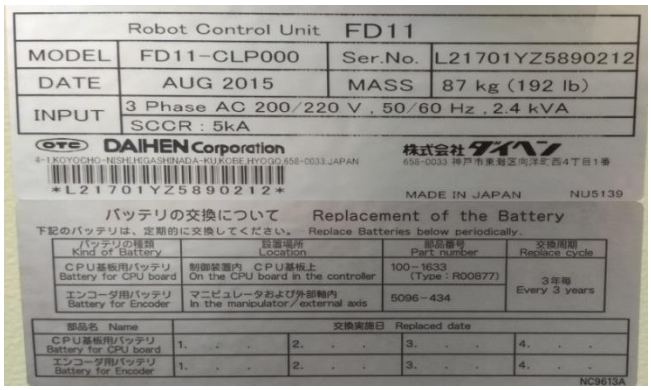
4.1. Oprema *D–Arc* robotiziranog sustava za zavarivanje

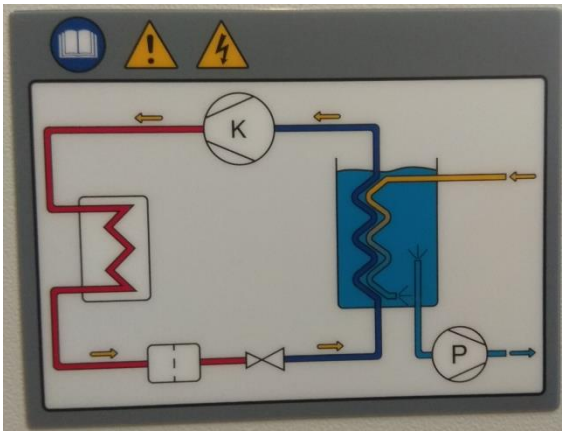
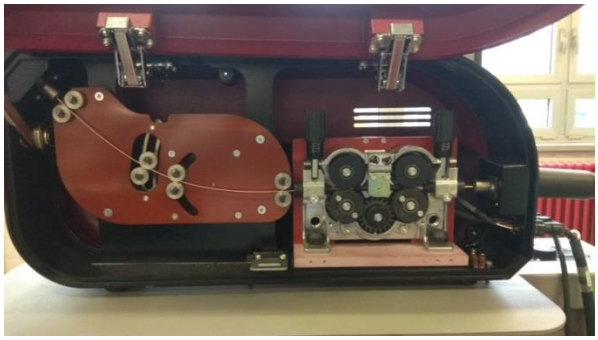
Postupak izrade prvog kutnog spoje proveden je na robotskoj stanici OTC Daihen (slika 22). Robotska ruka VRC FD – V20S – D – ARC je sastavni dio robotske stanice. Robot ima 7 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja preko kojeg postiže precizno pozicioniranje. Privjesak za učenje također je sastavni dio opreme i omogućava *on – line* programiranje, odnosno preko njega se ostvaruju putanje zavarivanja. Ostatak osnovne opreme i karakteristike prikazani su tablicom 7.



Slika 22. Robotska stanica OTC DAIHEN – sustav *D–Arc*

Tablica 7. Osnovna oprema *D–Arc* sustava

Uređaji sustava *D-Arc*	Slika uređaja	Karakteristike uređaja
2 izvora struje: Slave i Master		 OTC DAIHEN Corporation 4-1, KOYOCHO-NISHI, HIGASHINADA-KU, KOBE, HYOGO, JAPAN DC WELDING POWER SOURCE WB-M500D Y4434YPZ123781003 DATE 2017 IEC60974-1 30 A / 15.5 V - 360 A / 55.0 V X 100 % I_2 360 A U_2 55.0 V U_0 = 113 V 3~ 50/60 Hz U_1 = 400 V I_{1max} = 34 A I_{1eff} = 34 A IP23 Mass 81 kg MADE IN CHINA A7903
Servo upravljanje dobavom žice		 AC Servo Wire Feed Controller MODEL E2640 INPUT POWER 0.4kVA INPUT VOLT 3φ AC 200V FREQUENCY 50/60Hz MASS 65 kg DATE 2017 SERIAL No. E2640YDZ123631008 MADE IN JAPAN OTC DAIHEN Corporation A7883B
Upravljačka jedinica robota OTC FD 11		 Robot Control Unit FD11 MODEL FD11-CLP000 Ser.No. L21701YZ5890212 DATE AUG 2015 MASS 87 kg (192 lb) INPUT 3 Phase AC 200/220 V , 50/60 Hz , 2.4 kVA SCCR : 5kA OTC DAIHEN Corporation *L21701YZ5890212* MADE IN JAPAN NU5139 バッテリの交換について Replacement of the Battery Replace Batteries below periodically. CPU基板用バッテリ Battery for CPU board — On the CPU board in the controller — 100-1633 (Type : R00877) — 3年毎 Every 3 years エンコーダ用バッテリ Battery for Encoder — In the manipulator/external axis — 5096-434 部品名 Name / 交換実施日 Replaced date CPU基板用バッテリ Battery for CPU board エンコーダ用バッテリ Battery for Encoder NC9613A

Jedinica za hlađenje		
Robotska ruka		 DAIHEN VARSTROJ d.d. Lendava Made in Slovenia VARILNA ROBOTSKA CELICA N°1049331 VRC FD-V20S-D-ARC komplet 648407 CE Priključna napetost FD-V20S: 3x400V/50Hz +10% -15% Predvarovalke FD-V20S: 3 X 20A, 400V AC Predvarovalke WD-P500L M: 3 X 35A, 400V AC Predvarovalke WD-P500L S: 3 X 35A, 400V AC Predvarovalke HA-OBE 006: 1 X 16A, 230V AC Robotski manipulator: OTC FD-V20LS Postopek varjenja: D-ARC Število delovnih mest: 1 dm Varilni izvor 1 / 2: WB P500L M / WB P500L S Gabariti naprave: 3.200 x 2.400 x 2.500 mm Skupna masa: cca: 1.600 kg Leto izdelave: 2017
Međuspremnik (dodavač) žice		

Od ostale opreme mogu se još izdvojiti privjesak za učenje, kolut dodatne žice i spremnici zaštitnog plina prikazani na slici 23.

Slika 23. Privjesak za učenje (lijevo), kolut žice (sredina) i spremnici zaštitnog plina (desno)

4.2. Oprema konvencionalnog robotiziranog MAG zavarivanja

Izrada kutnog spoja konvencionalnim MAG postupkom provedena je na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 (slika 23). Robotska stanica izvedena je na istom principu kao i prethodno opisana *D–Arc*, samo bez dvostruko kombiniranih izvora struje, međuspremnika, odnosno dodavača žice i s slabijim sustavom hlađenja. Naravno i sam pištolj za zavarivanje na kraju robotske ruke je manje masivan zbog nižih unosa topline, nižih vrijednosti struja i sl. Robot ima 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja, opremljen je privjeskom za učenje, senzorima i ostalom opremom.

Tablica 8. Karakteristike izvora struje DP400

Izvor struje		DP 400
Priključeni napon, V / Hz		400 / 50
Područje struje zavarivanja, A,		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija, A	100 %	283
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		46
Dimenzije (D × Š × V), mm		653 × 300 × 595

4.3. Osnovni materijal

U eksperimentalnom dijelu kao osnovni materijal korištene su čelične ploče napravljene od konstrukcijskog čelika S355J2N+N. Debljina ploče je 20 mm, a kemijski sastav i mehanička svojstva prikazani su tablicama 9 i 10.

Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala

C	Si	Mn	P	S	N	Cu
0.17	0.24	1.25	0.016	0.006	0.008	0.23
Cr	Ni	Mo	Al	V	Ti	Nb
0.06	0.1	0.11	0.032	0.005	0.025	0.033

Tablica 10. Mehanička svojstva osnovnog materijala

$Rp_{0.2}$, MPa	Rm, MPa	A_5, %	Av, J	T, °C
429	580	21	58 (58, 70, 58)	-20

4.4. Dodatni materijal

Za izvedbu zavarenih spojeva konvencionalnim postupkom i *D–Arc* sustavom korištene su različite žice, odnosno dodatni materijal.

4.4.1. Dodatni materijal kod D–Arc postupka

Žica za zavarivanje prema normi ISO 14341 – A bila je VAC 60 G42 5M/C G3 Si1. Promjer žice je 1.6 mm, a kemijski sastav i mehanička svojstva prikazani su tablicama 11 i 12.

Tablica 11. Kemijska svojstva dodatnog materijala kod *D–Arc* sustava

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.90	1.50	<0.025	<0.025

Tablica 12. Mehanička svojstva dodatnog materijala

$Rp_{0.2}$, MPa	Rm, MPa	A_5, %	Av, J	T, °C
> 420	500 - 640	20	47	-50

4.4.2. Dodatni materijal kod konvencionalnog MAG zavarivanja

Dodatni materijal korišten kod MAG postupka je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb dd. Tip žice je EZ – SG 2 oznake G 42 4 C/M 3Si1 (prema normi HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike: Razredba.) promjera 1,2 mm. Detaljne specifikacije prikazane su na slici 24.

EZ - SG 2

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

= +

Slika 24. Specifikacija dodatnog materijala kod konvencionalnog MAG postupka

4.5. Zaštitni plin

Kao zaštitni plinovi prikazani tablicom 13 koristile su se dvokomponentne mješavine plinova argona i ugljičnog dioksida (Ar – CO_2). To su najčešće primjenjivane dvokomponentne mješavine. Podržavaju sve načine prijenosa materijala električnim lukom. CO_2 svojom disocijacijom u električnom luku oslobađa kisik te talini pridodaje veću viskoznost, a luku pridonosi stabilizaciju.

Tablica 13. Prikaz korištenih plinskih mješavina

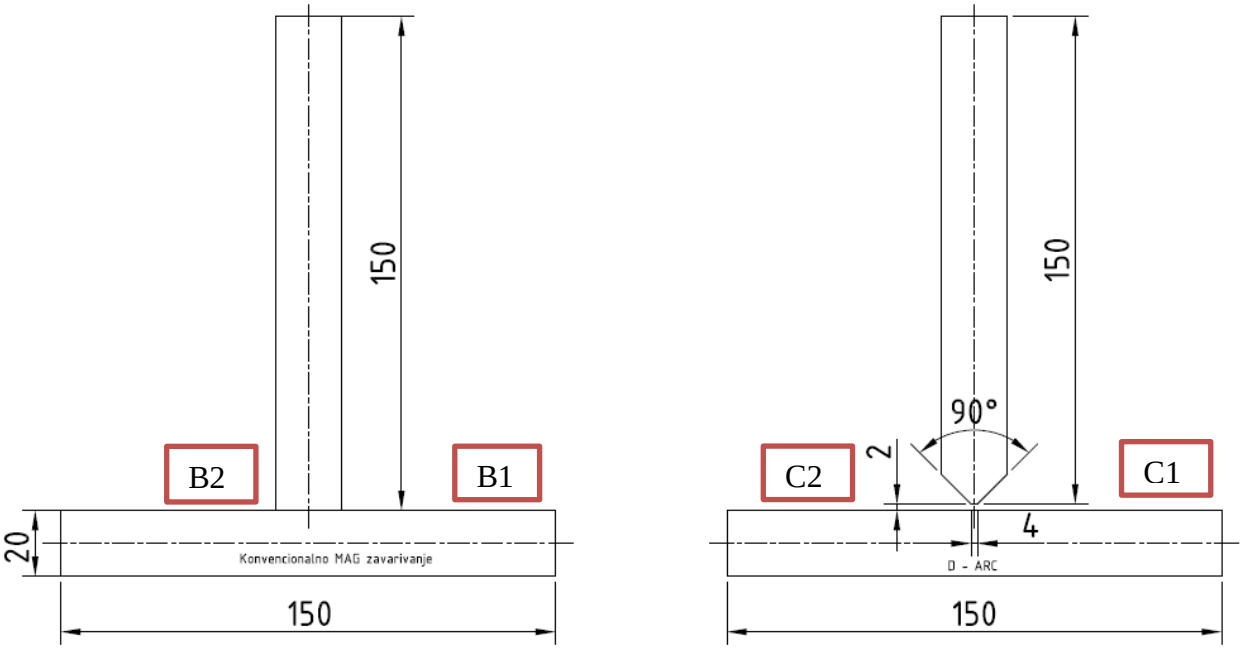
Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav, %			Postupak po HRN EN 14610	Protok plina u eksperimentu, L/min	Primjena
		Ar	O2	CO_2			
Ferroline C18	M21	82		18	MAG / *D ARC*	18 (MAG)	Nelegirani/ niskolegirani čelici
Ferroline C12 X2	M24	86	2	12	MAG / *D ARC*	23 (*D – ARC*)	Nelegirani/ niskolegirani čelici

4.6. Priprema kutnog spoja i sustav označavanja uzoraka

Priprema spoja sastojala se od brušenja površina ploča i rubova kako bi se izbjegli kasniji potencijalni uključci i nepravilnosti u zavarenom spoju. Naknadno, za oba robotizirana postupka ploče su se morale pripojiti na rubovima radi lakšeg zavarivanja na robotu.Sama priprema kutnog spoja razlikovala se kod *D–Arc* postupka i konvencionalnog MAG zavarivanja. Slikom 25 prikazana je priprema spoja kod *D–Arc* i konvencionalnog postupka robotiziranog zavarivanja. Duljina ploča iznosi 300 mm. Za potrebe naknadne analize tablicom 14 prikazan je sustav označavanja uzoraka.

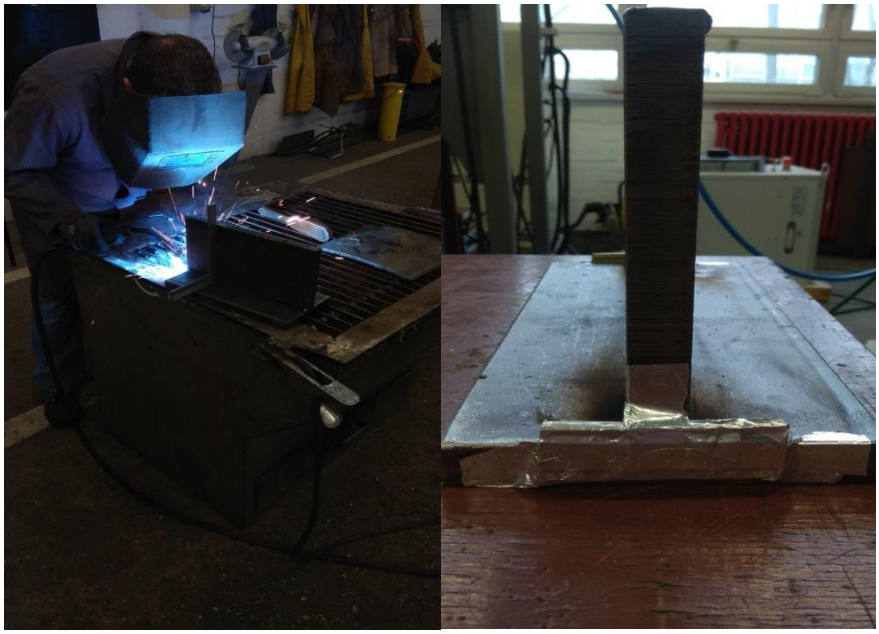
Tablica 14. Označavanje uzoraka

Postupak zavarivanja	Oznaka postupka	Strana I. zavara	Strana II.zavara
D–Arc	C	1	2
MAG konvencionalno	B	1	2



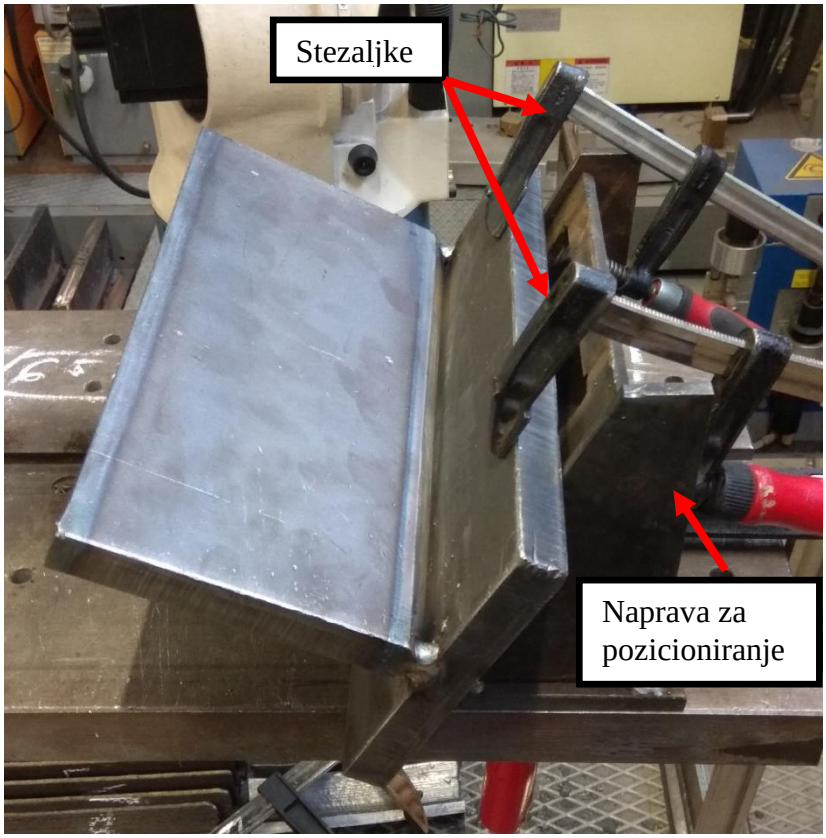
Slika 25. Priprema spoja: konvencionalno MAG (B), *D–Arc* (C)

Nakon pripreme i pripajanja ploča, slijedilo je lijepljenje keramičkih pločica na rubove spoja radi sprječavanja razlijevanja taline preko rubova u trenutku kad pištolj zavarivanja prolazi kroz sam kraj spoja. Slika 26. prikazuje pripajanje ploča i primijenjenu keramičku pločicu na spoju.



Slika 26. Pripajanje ploča i stavljanje keramičkih pločica na spoj

Kako bi se osigurao lakši pristup pištolja za zavarivanje i optimalan kut tijekom zavarivanja, u eksperimentu se koristila naprava izrađena u laboratoriju za zavarivanje. Naime, svrha naprave je da je spoj pod određenim nagibom (cca. 45°) i da je položaj zavarivanja kombinacija ravnog (PA) i horizonatalno vertikalnog (PB) zavarivanja prema normi EN ISO 6947. Slika 27 prikazuje pričvršćen spoj na napravu koji je spreman za zavarivanje. Naprava je korištena u oba robotizirana zavarivanja.

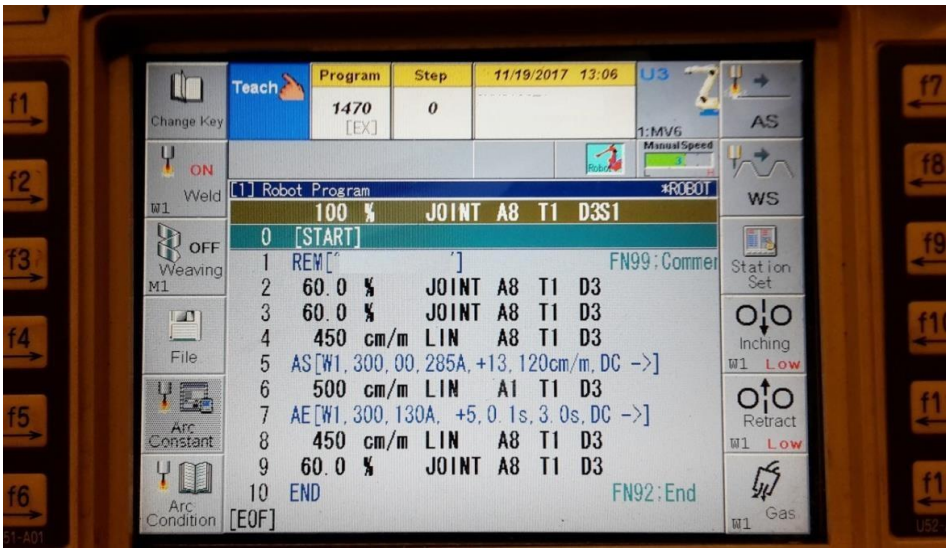


Slika 27. Stezaljke i naprava za pozicioniranje obratka

Na slici 28 prikazano je postavljanje i programiranje pištolja robota u početnu točku zavarivanja. Naime, preko privjeska za učenje dovodimo pištolj u točke preko kojih želimo ostvariti putanju zavarivanja i navedene točke spremamo u program. Naknadno se definira u programu vrsta (interpolacija) kretanja između pojedinih točaka. Kod putanje zavarivanja, budući da zavar mora biti ravan, definira se linearna interpolacija.

Slika 28. Pozicioniranje pištolja za zavarivanje u početnu točku

Kod *D–Arc* postupka u programu nije bilo zadana opcija njihanja uz određeno vremensko zaustavljanje budući da je zavarivanje bilo jednoprolazno sa svake strane, dok je kod konvencionalnog njihanje bilo prisutno zbog relativno konzervativnijih parametara, manje žice i sl. Primjer programa prikazan je slikom 29.



Slika 29. Primjer programa na privjesku za učenje

4.7. Parametri zavarivanja

Kod definiranja parametara za zavarivanje napravljeno je nekoliko predpokusa kako bi se ostvario čim kvalitetniji zavareni spoj kod oba postupka i omogućila kvalitetnija usporedba i analiza rezultata. Nakon što su parametri optimizirani i spojevi pripremljeni, izvedeno je robotizirano zavarivanje. Budući da je *D–Arc* postupak relativno nova tehnologija zavarivanja, iskoristivost postupka je još relativna nepoznanica, pa će se u okviru ovog rada uračunavati kao vrijednost od 0,8. U tablicama 14 i 15 prikazani su očitani parametri zavarivanja za oba postupka.

Tablica 15. Parametri zavarivanja *D–Arc* postupkom

Strana (oznaka) zavara	Struja, A	Napon, V	Promjer žice, mm	Brzina zav. cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Nagib pištolja, °	Unos topline, kJ/cm
C1	533	41	1,6	30	28	90	34,9
C2	535	41	1,6	30	28	90	35,1

Tablica 16. Parametri zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom

Parametri zavarivanja	Prolaz				
	B1 korijen	B1 popuna 1	B1 popuna 2	B2 korijen	B2 popuna 2
Struja, A	250	310	310	340	400
Napon, V	27	32	32	32	38
Promjer žice, mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Brzina zav. cm/min	25	14	20	25	20
Nagib pištolja, °	60 do 80	60 do 80	60 do 80	60 do 80	60 do 80
Unos topline, kJ/cm	13	33	24	21	36
Njihanje, mm		3 (desno)	8 mm (lijevo)	-	4 (obje strane)
Zadržavanje, s	-	0,2 (obje strane)	0,2 (lijevo)	-	0,2 (obje strane)

Unos topline računa se prema izrazu (1) iz norme HRN EN 1011-1:

$$q = \frac{U \times I \times \eta}{v_{ZAV}}, \frac{J}{mm} \qquad (1)$$

pri čemu su:

q – unos topline, J/mm

v_{zav} – brzina zavarivanja, mm/s

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

$\eta_{MAG/D\text{-}ARC}$ – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja.

Uz prethodno navedene i podešene parametre na robotskim ćelijama izrađeni su zavareni spojevi. Na slici 30 prikazan je proces zavarivanja *D–Arc* postupkom. Jasno je uočljivo rasprskavanje zbog visokih unosa topline, odnosno visokih iznosa struje. Međuprolazna

temperatura kod MAG te temperatura zavarivanja s druge strane kutnog spoja kod *D–Arc* postupka prema normi HRN EN 1011 - 2 nije smjela prelaziti vrijednost od 250 °C. Slike 31 i 32 prikazuju dobivene spojeve kod oba postupka.

Slika 30. Prikaz zavara napravljen *D–Arc* postupkom

Slika 31. Prikaz zavara dobivenog konvencionalnim MAG postupkom

4.8. Provedena ispitivanja nakon zavarivanja

U svrhu istraživanja *D–Arc* tehnologije i analizu odabranih parametara, na uzorcima su provedena sljedeća ispitivanja:

- radiografija kutnih zavarenih spojeva
- analiza makroizbruska uz osvrt na mikrostrukturu
- mjerenje tvrdoće po Vickersu (HV 10) u dvije linije po zavaru

4.8.1. Radiografsko ispitivanje

Radiografija se provodi s ciljem uočavanja nepravilnosti u geometriji zavara što podrazumijeva pore, uključke, poroznost, pukotine i sl. Ispitivanje je provedeno izvorom zračenja (RTG) na slikovne ploče. S ploča se skeniranjem slikovni zapis prebacuje u digitalni oblik koji se analizira prikladnim alatom, odnosno programom *iSee*. Tablicom 17 prikazani su podaci o opremi, parametrima snimanja i skeniranja.

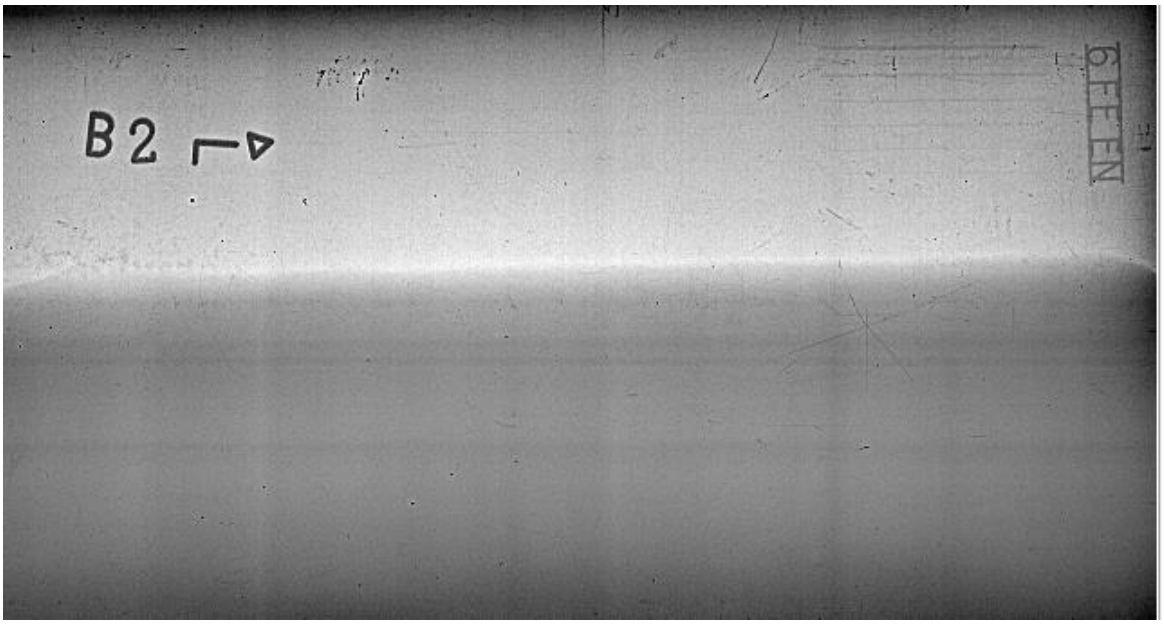
Tablica 17. Specifikacije o opremi i parametri ispitivanja

Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
RTG uređaj	BALTEAU GM 300D
Skener	VMI 5100
Slikovna ploča	Kodak industrex flex HR
Parametri snimanja	
Napon, kV	275 kV
Struja, mA	4 mA
Vrijeme ekspozicije, min	3 min 15 s
Udaljenost fokusa, mm	700 mm
Parametri skeniranja	
Napon lasera, V	15
Napon fotomultiplikatora, V	5,25
Rezolucija snimanja, 50	50

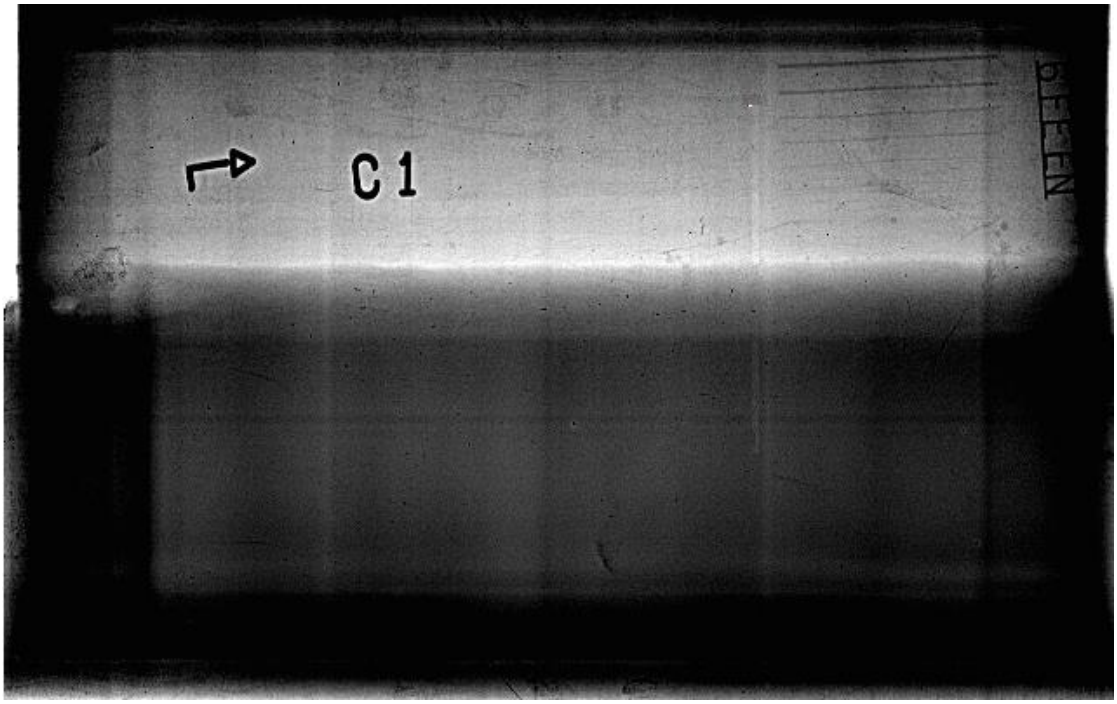
Prije same radiografije uzorci su bili prikladno označeni, a na njih su se postavile mjerne igle koje određuju radiografsku osjetljivost. Naime, najtanja igla koju još uvijek možemo uočiti okom nam određuje radiografsku osjetljivost. Slika 33 prikazuje uzorak spreman za radiografiju.

Slika 32. Uzorak prije radiografskog ispitivanja

Vizualnom kontrolom s aspekta hrapavosti, uglađenosti i estetike možemo uočiti da je zavar kod postupka konvencionalnog MAG zavarivanja potencijalno "čišći" i da je mogućnost pojave uključaka, pora i sl. puno manja. Radiogrami na slikama 34 i 35 prikazuju unutrašnjost metala zavara. Kod odabira radiograma uzete su "lošije" strane zavara od svakog postupka.

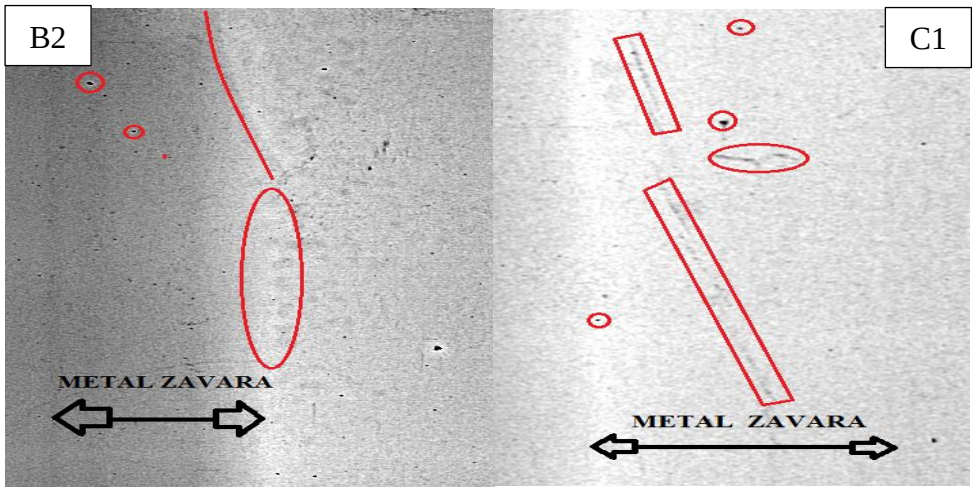


Slika 33. Radiogram zavara izveden konvecnionalnim Mag postupkom (strana B2)



Slika 34. Radiogram zavara izveden *D–Arc* postupkom (strana C1)

Slika 36 prikazuje izvučene detalje potencijalnih grešaka kod oba postupka (B2 i C1 uzorci). Na uzorku B2 možemo uočiti crne točkice koje predstavljaju uključke troske, djelomično uzrokovane višeprolaznim zavarivanjem, dok nam drugi detalj može sugerirati na potencijalno neprovaren rub zavara, odnosno blagu pojavu naljepljivanja i ugorina. Kod uzorka C1 broj pojavljenih nepravilnosti je nešto veći, a iz izdvojenog detalja uočavaju se također uključci troske i neke poprečno uzdužne geometrijske nepravilnosti smještene u višim zonama zavara.

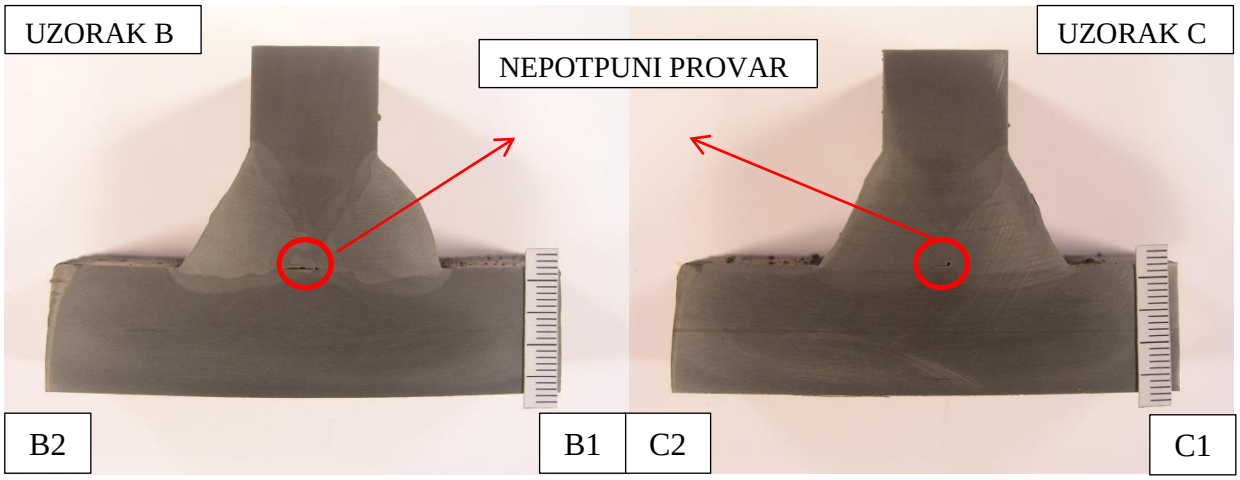


Slika 35. Prikaz izdvojenih detalja grešaka uzoraka B2 i C1

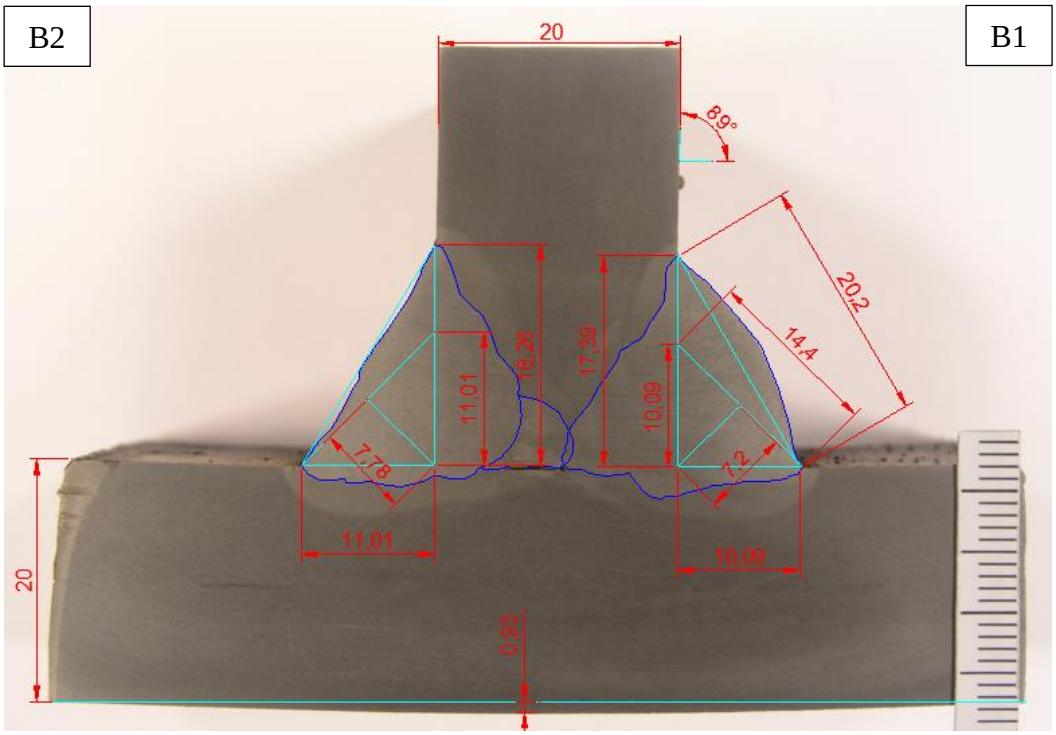
4.8.2. Analiza makrostrukture

Nakon provedenog radiografskog ispitivanja, izrezani su makroizbrusci za svaki postupak. Uzorci su izrezani na tračnoj pili, te su ručno brušeni brusnim papirom redom: P500, P1000 i P2000. Naknadno uzorci su nagrizani u 5 %-tnoj otopini NITAL-a u vremenskom trajanju od 10 s.

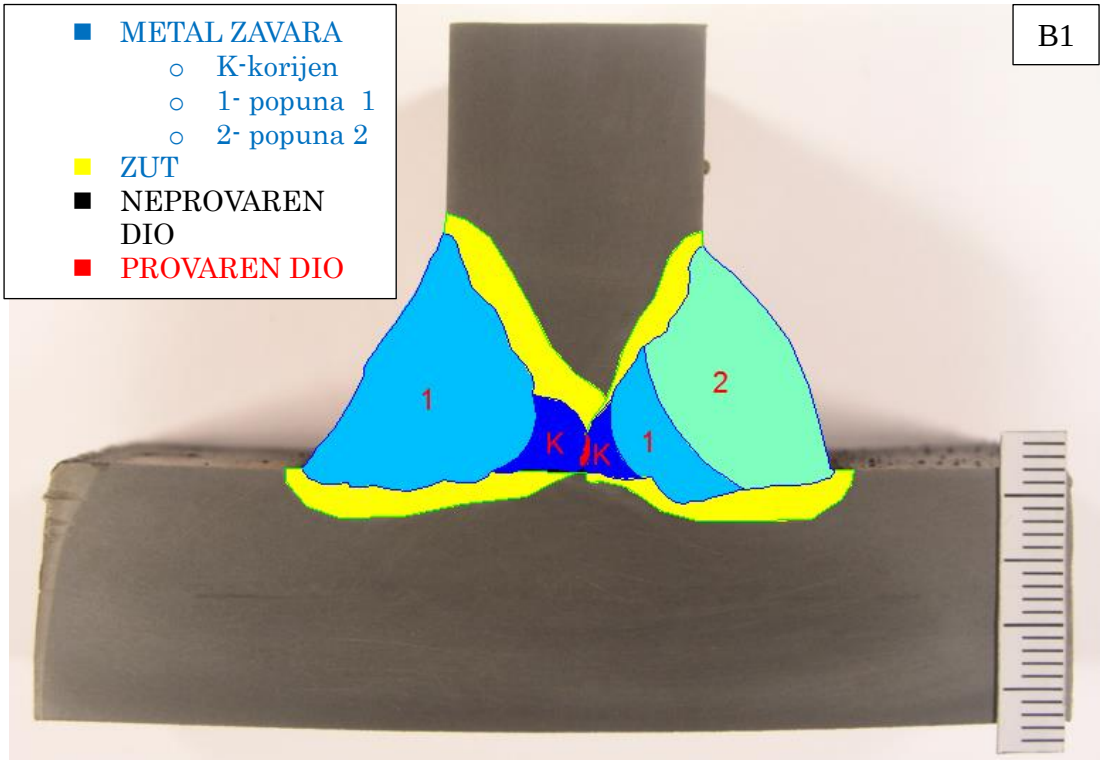
Usporedbom makroizbrusaka konvencionalnog i *D–Arc* postupka vidljivo je da su metali zavara vrlo slične strukture i površine su sličnih veličina. Osnovni prikaz makroizbrusaka uzoraka B i C prikazani su slikama 37 na kojima možemo izdvojiti pukotine odnosno nepotpune provare. Uzorak MAG postupka sa strane B1 ima konkavniju površinu zavara, a uzrok tome je nešto sporija brzina zavarivanja jer je u završnoj popuni uključeno njihanje. Na slikama 38 prikazane su standardne dimenzije kutnog zavara uzorka B, dok slika 39 prikazuje zone metala zavara, ZUT-a i zonu djelomičnog provara. Prikazi dimenzija i površina dobiveni su računalnim alatom Autocad 2013. Također kod uzorka B vidljiv je dio neprovarenog područja u sredini spoja što se može povezati s nagibom pištolja tijekom samog procesa zavarivanja. Naime cijeli proces je bio usmjeren previše u horizontalnom smjeru i ploče nisu savršeno protaljene i nije postignuta homogenost u centru spoja. Navedena problematika vjerojatno bi bila uspješno riješena povećanjem kuta pištolja. Bitno je spomenuti da bi se korekcijom kuta pištolja također izjednačile visine zavara u svaku stranu ploče, čime bi se automatski povećala dimenzija dubine zavara.



Slika 36. Makroizbrusci uzoraka B i C



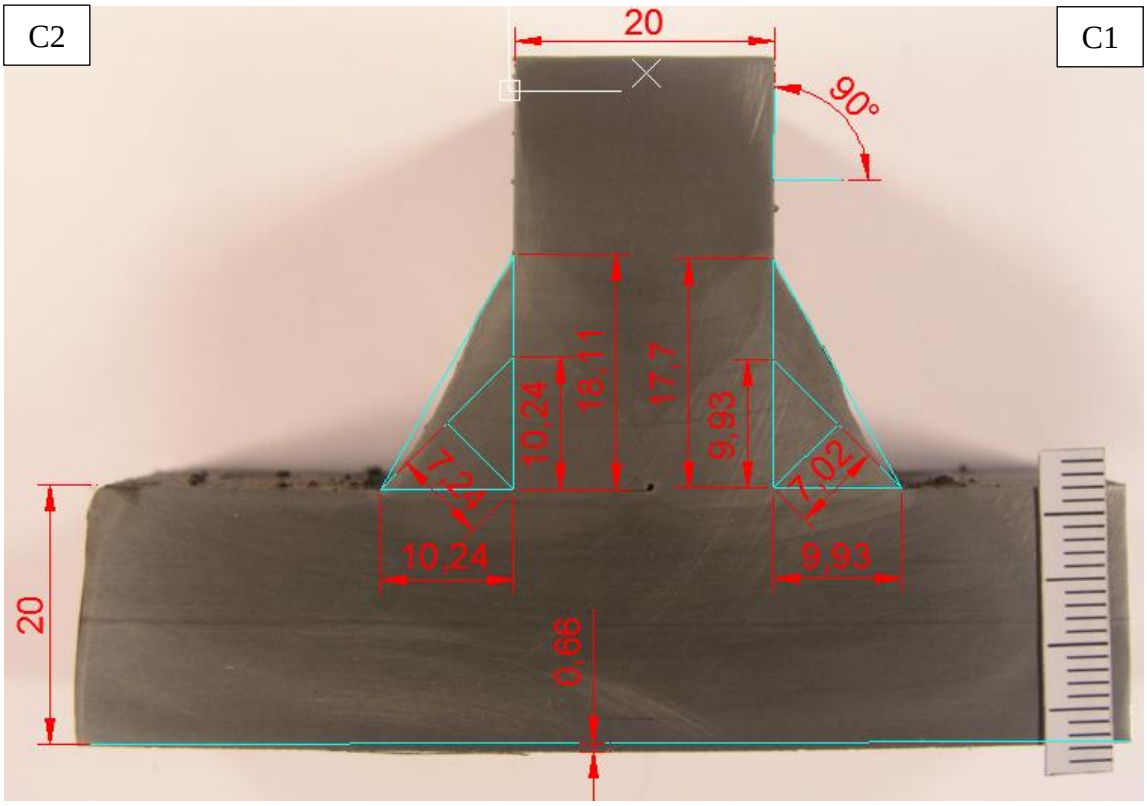
Slika 37. Prikaz standardnih dimenzija kutnog zavara – uzorak B



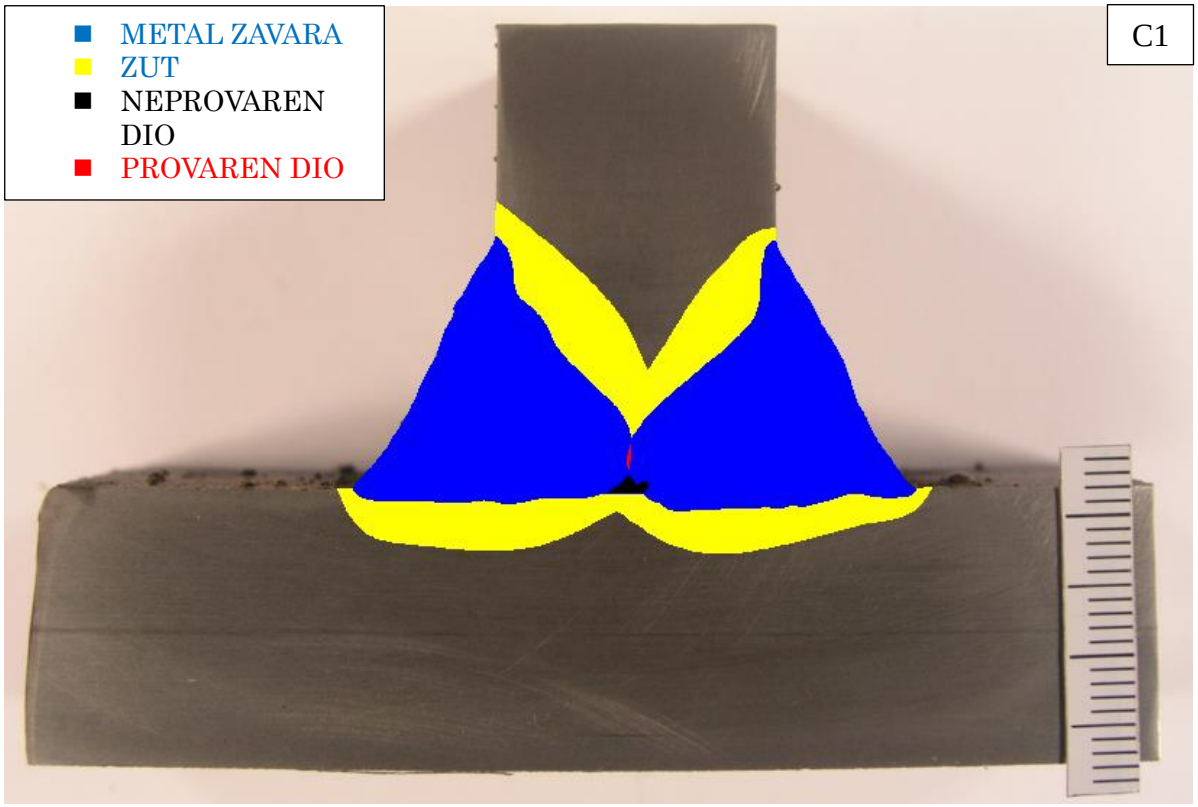
Slika 38. Prikaz metala zavara i ZUT-a – uzorak B

Makroizbrusak uzorka C karaktiziraju "simetrične", odnosno jednake dimenzije zavara s obje strane što je i očekivano zbog jednosprolaznog načina zavarivanja. Slično kao i kod uzorka B nagib pištolja rezultira različitim visinama zavara sa svake strane ploča. Slike 40 i 41 prikazuju dimenzije zavara, odnosno područja metala zavara, ZUT-a te provarenog i neprovarenog dijela spoja.

S pogleda deformacija, uzorak B pokazuje veće iznose deformacija. Progib horizntalne ploče nešto je veći nego kod uzorka C, a i kut između ploča nakon zavarivanja ne iznosi 90°. Uzrok tome je i neravnomjernost međuprolaza sa svake strane, jer se prvo zavarila kompletna B1 strana, a nakon toga strana B2. Zbog toga i proizlazi da je vertikalna ploča nagnuta za 1° na B1 stranu.



Slika 39. Prikaz standardnih dimenzija kutno zavara – uzorak C



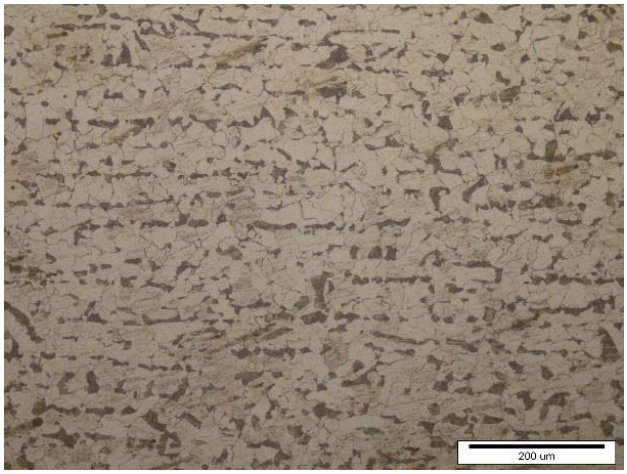
Slika 40. Prikaz metala zavara i ZUT – a – uzorak C

4.8.3. Osvrt na mikrostrukturu

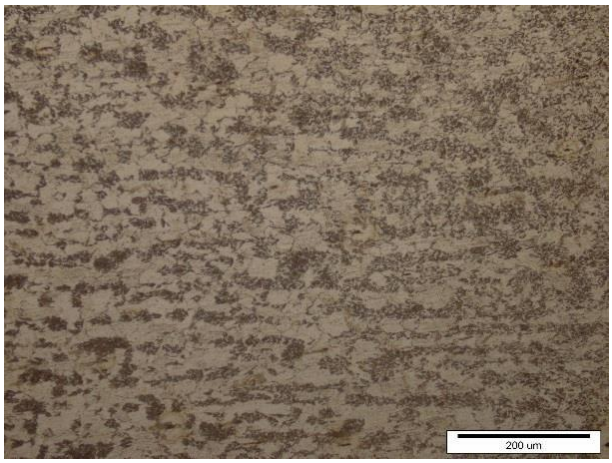
Budući da eksperimentalni dio ovog rada ne obuhvaća detaljnu obradu i analizu mikrostrukture preuzet je kratki osvrt i analiza iz istraživanja koje se provelo također u Laboratoriju za zavarivanje FSB –a.

Mikrostruktura osnovnog materijala je feritno – perlitna u normaliziranom stanju, a prosječna veličina zrna iznosi 35 µm. Dio ZUT-a sa strane osnovnog materijala je zagrijan između temperatura A_{C1} *i* A_{C3}. U tom području mikrostruktura je djelomično izmijenjena. Dio zrna se prilikom zagrijavanja pretvorio u austenit, koji se naknadno hlađenjem pretvorio u bainit. Ostali dio zrna se ne mijenja.

Mikrostruktura metala zavara karakteriziraju velika zrna u području linija staljivanja te se ista pojava javlja i u centru zavara. Na slikama 42, 43 i 44 prikazane su mikrostrukture osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara dobivenog *D–Arc* postupkom u sličnim uvjetima kao i kutni spoj obrađivan u ovom radu [1].



Slika 41. Mikrostruktura osnovnog materijala [1]



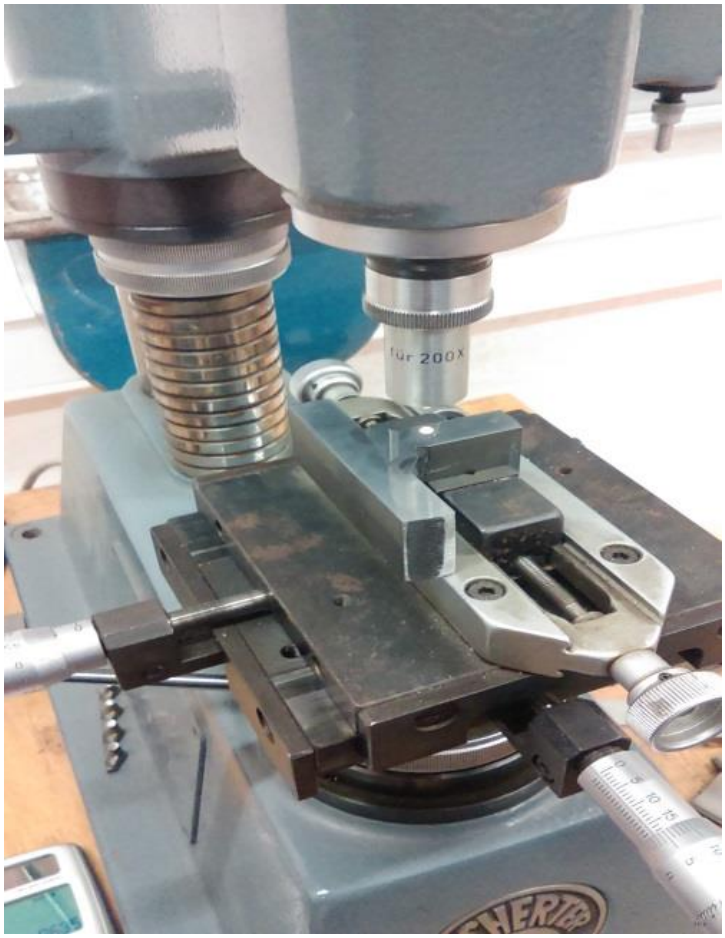
Slika 42. Mikrostruktura ZUT – a [1]

Slika 43- Mikrostruktura metala zavara [1]

4.8.4. Mjerenje tvrdoće

Isptivanje tvrdoće Vickersovom metodom (HV 10) izvršeno je na oba uzorka, s obje strane u vanjskoj i unutarnjoj zoni zavara. Mjerenje je izvršeno na osnovnom materijalu, ZUT – u i metalu zavara s time da se tvrdoća mjerila i na samoj liniji staljivanja.

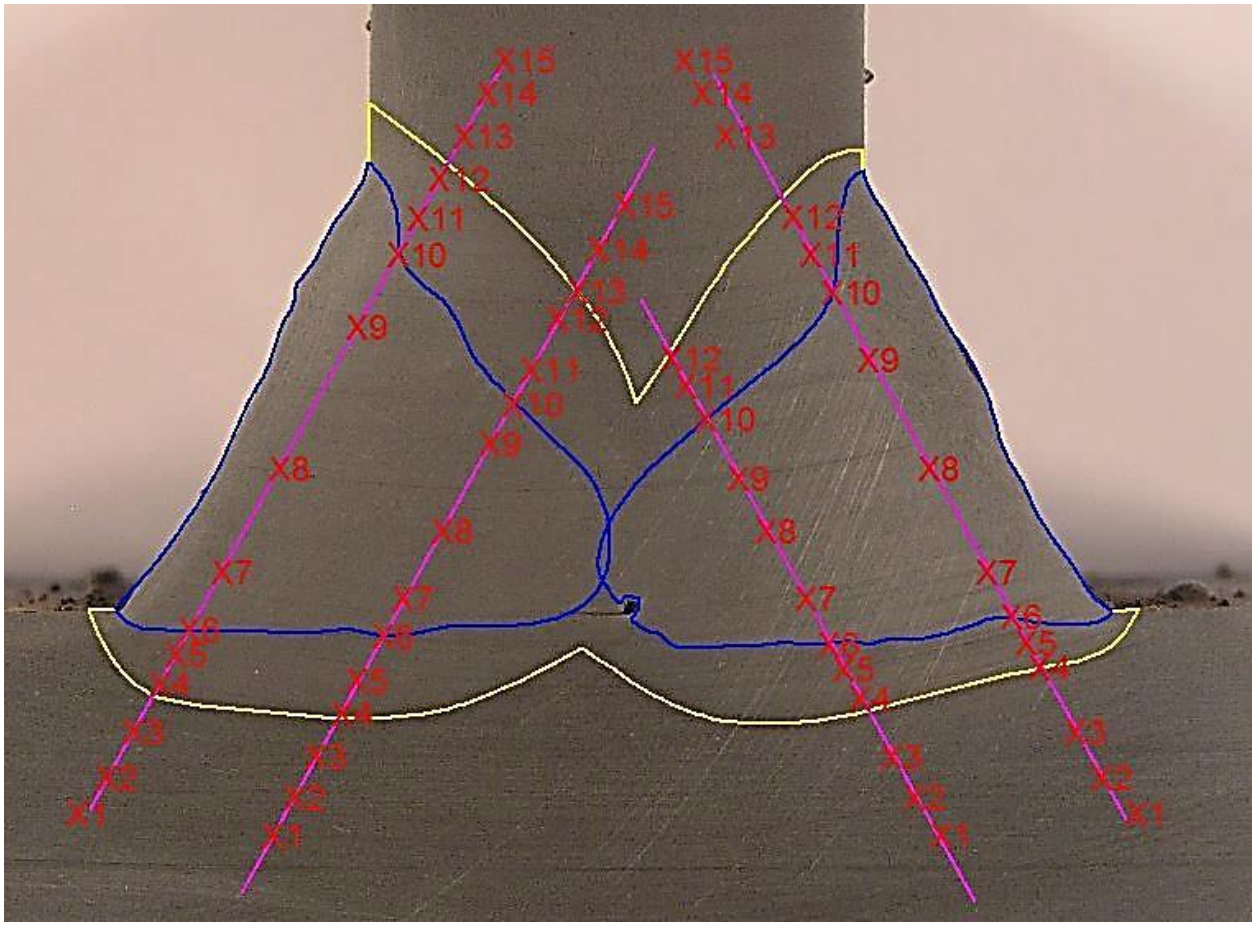
Mjerenje je provedena na tvrdomjeru Reicherter TM12 prikazan slikom 45. Primjenjena sila iznosila je 10 kiloponda, odnosno 98,04 N.



Slika 44. Tvrdomjer Reicherter TM12

Trajanje utiskivanja opterećenja iznosilo je 10 s. Kod Vickersove metode tvrdoća se određuje veličinom otiska dijamantnog indentora u obliku četverostrane piramide s kutom od 136° između nasuprotnih stranica.

Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline, prema shemi na slici 46. Na svakoj strani zavara napravljeno je po 15 mjerenja, odnosno 60 mjerenja na uzorku.



Slika 45. Shema mjerenja tvrdoće kod oba uzorka

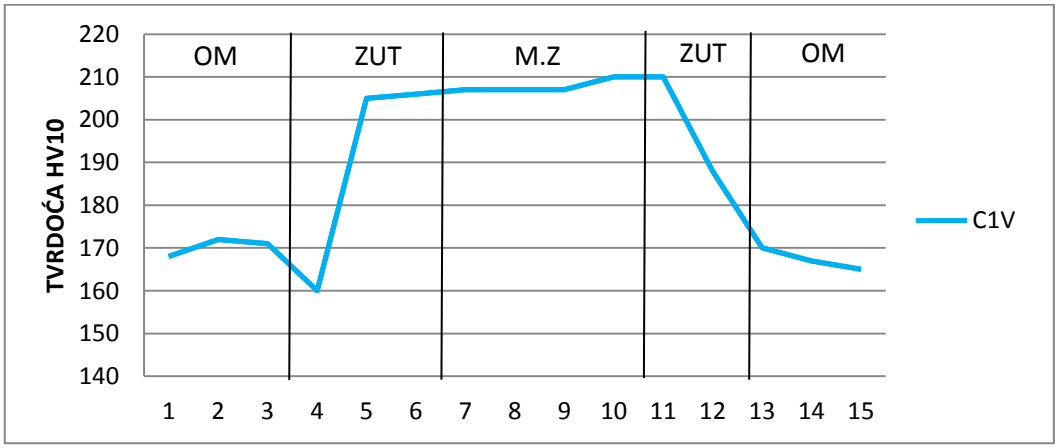
Na svakom uzorku je bilo po 60 mjerenja u 4 linije što ukupno čini 120 mjernih točaka. U tablicama 18 i 19 prikazane su izmjerene vrijednosti tvrdoće na uzorcima B i C. Naknadno, podaci su prikazani grafički na slikama 47 do 50.

Tablica 18. Iznosi tvrdoća na uzorku B

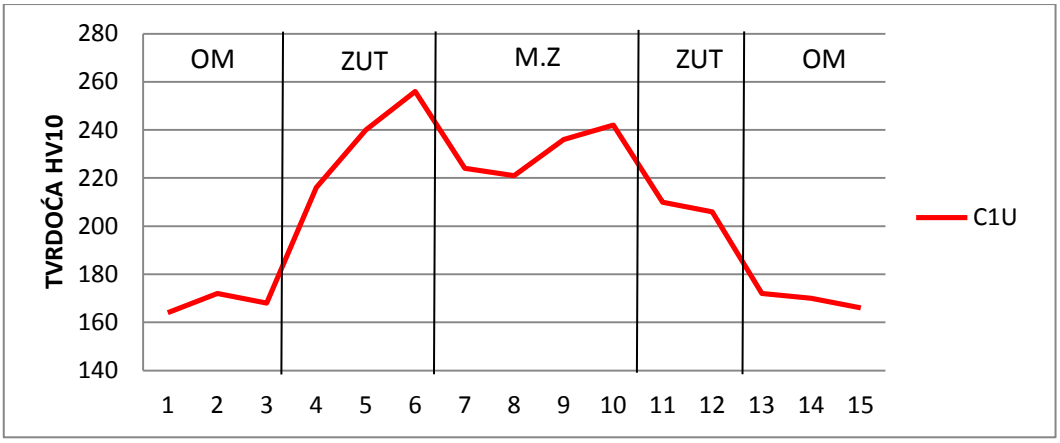
LINIJE	VANJSKE		UNUTARNJE	
STRANA ZAVARA	B2	B1	B2	B1
O.M.DOLJE	165	165	167	165
	172	163	174	160
	171	165	170	170
ZUT DOLJE	185	187	221	228
	205	205	233	230
	221	199	238	236
ZAVAR	206	206	233	240
	205	207	232	232
	210	209	236	230
ZUT GORE	209	221	253	260
	219	197	233	235
	191	194	206	230
O.M. GORE	172	171	174	170
	170	168	172	166
	168	162	166	160

Tablica 19. Iznosi tvrdoća na uzorku C

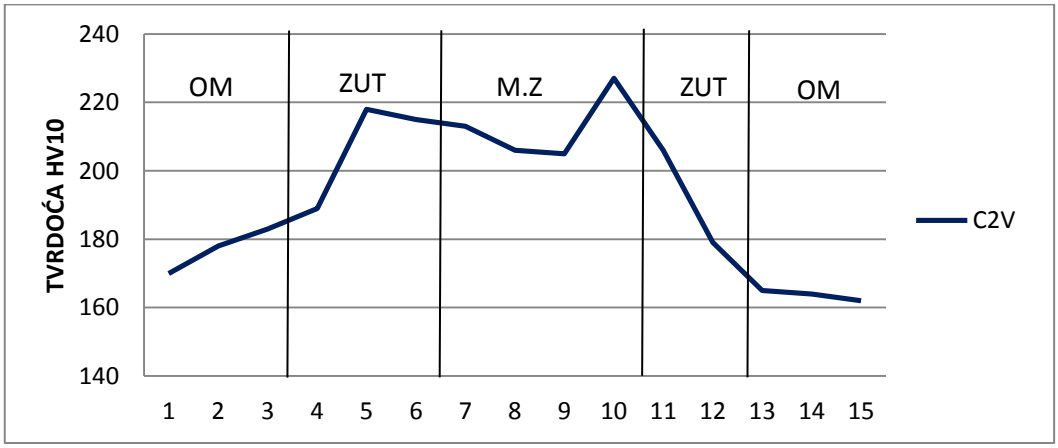
LINIJE	VANJSKE		UNUTARNJE	
STRANA ZAVARA	C2	C1	C2	C1
O.M.DOLJE	170	168	174	164
	178	172	178	172
	183	171	180	168
ZUT DOLJE	189	160	207	216
	218	205	251	240
	215	206	224	256
ZAVAR	213	207	236	224
	206	207	228	221
	205	207	233	236
ZUT GORE	227	210	254	242
	206	210	243	210
	179	188	201	206
O.M. GORE	165	170	170	172
	164	167	168	170
	162	165	166	166



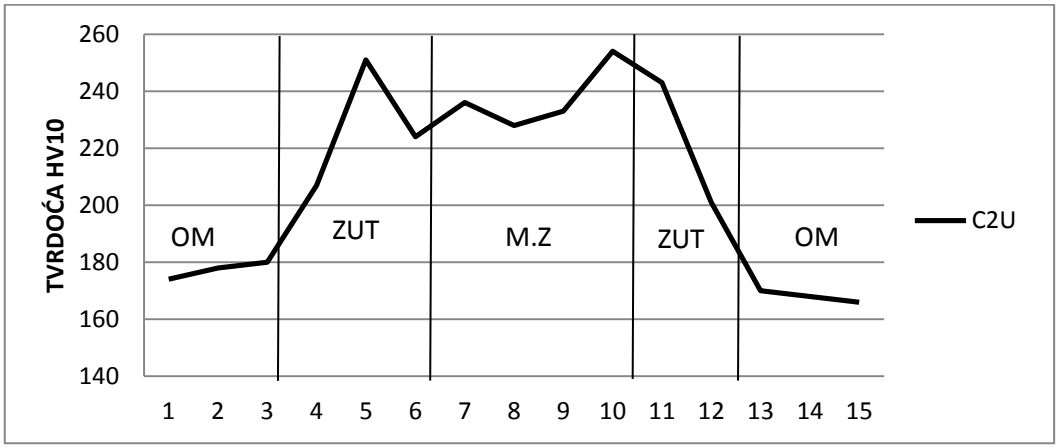
Slika 46. Prikaz tvrdoća na uzorku C1V



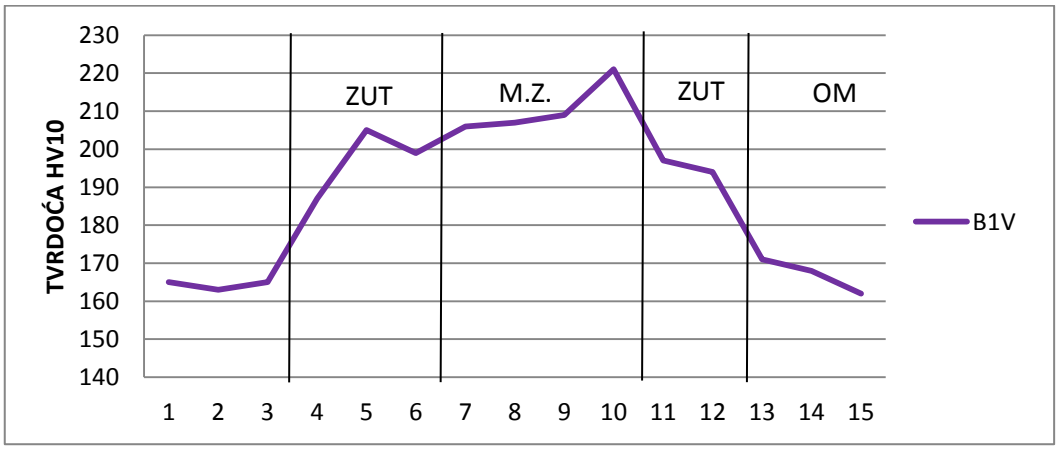
Slika 47. Prikaz tvrdoća na uzorku C1U



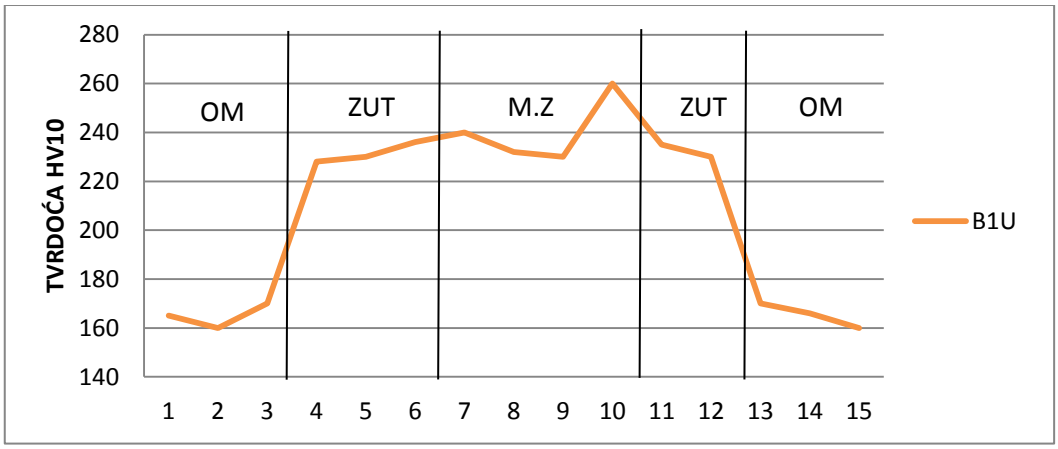
Slika 48. Prikaz tvrdoća na uzorku C2V



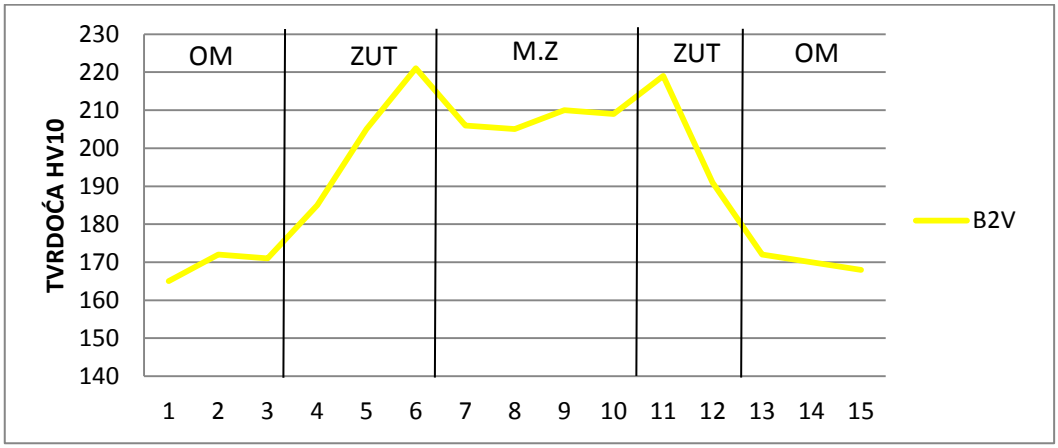
Slika 49. Prikaz tvrdoća na uzorku C2U



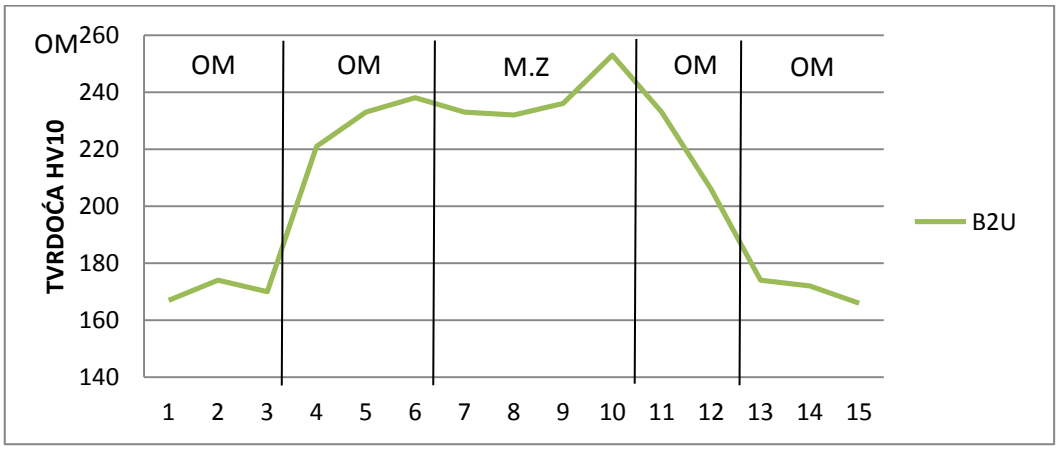
Slika 50. Prikaz tvrdoća na uzorku B1V



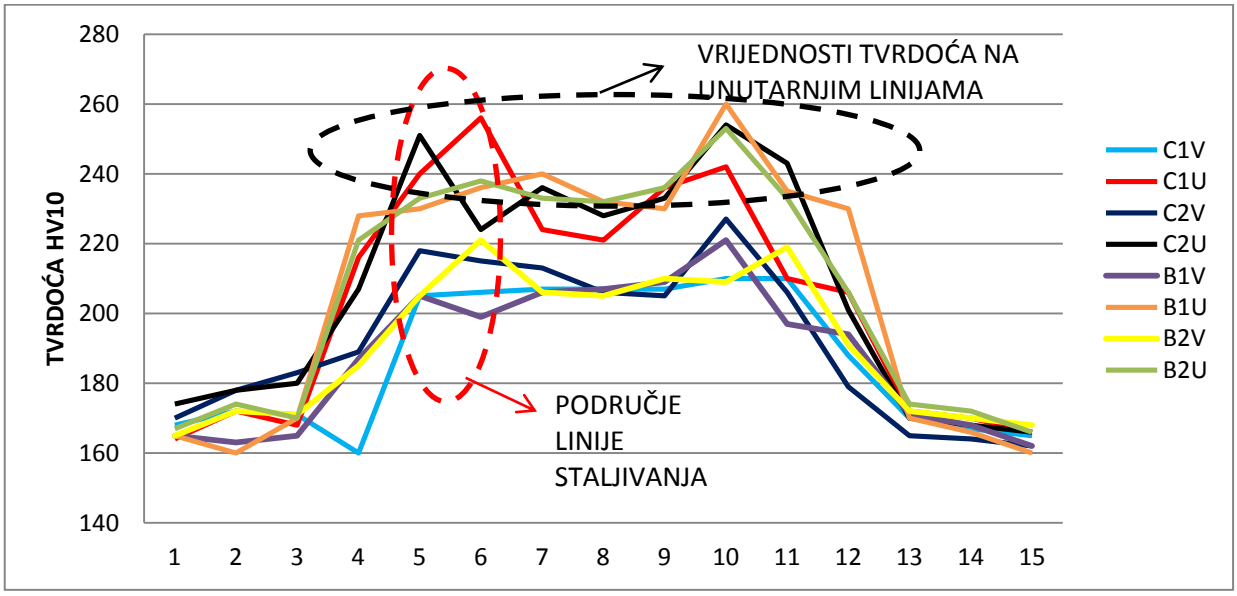
Slika 51. Prikaz tvrdoća na uzorku B1U



Slika 52. Prikaz tvrdoća na uzorku B2V



Slika 53. Prikaz tvrdoća na uzorku B2U



Slika 54. Prikaz i usporedba tvrdoća na svim uzorcima

4.8.5. Ekonomska analiza i završna usporedba D–Arc i konvencionalnog MAG postupka

Nakon analize i usporedbe tehničkih podataka, vrlo je važno uzeti u obzir i ekonomske faktore koji znatno utječu na odabir tehnologije u industriji. Naime jedna od najbitnijih značajki je vrijeme trajanja nekog procesa, što uključuje i samu pripremu spoja, broj prolaza u samom zavarivanju kao i na kraju tehničke specifikacije samog proizvoda. Naravno, bitan faktor je i cijena opreme, investicija u razvoj tehnologije i sl. Uspoređujući *D–Arc* i MAG postupak zavarivanja, postoje neke znatne razlike u tehnologijama. U tablici 20. prikazani su vremenski periodi operacija koje su slijedile od početka do završetka izrade zavarenog spoja kod *D–Arc* postupka, dok si u tablici 21 prikazani isti podaci za MAG postupak.

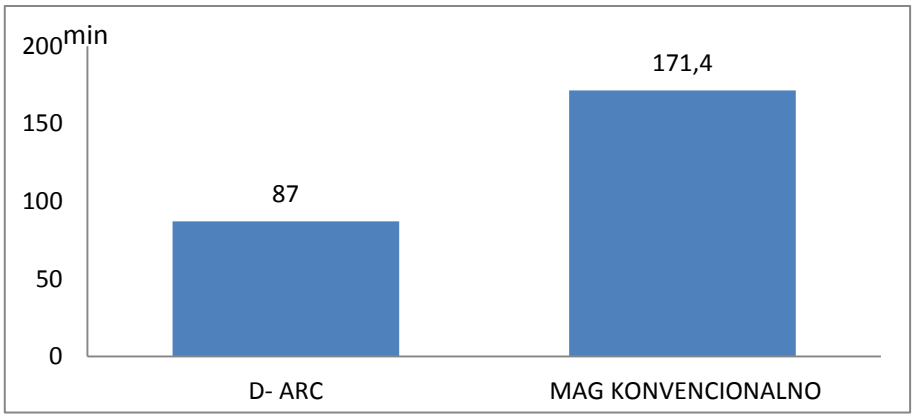
Tablica 20. Prikaz ukupnog trajanja procesa pripreme i zavarivanja – *D–Arc* postupak

OPERACIJE – D-ARC POSTUPAK	Vrijeme trajanja, min
ČIŠĆENJE PLOČA	5
PRIPAJANJE	10
MONTAŽA KERAMIČKIH PLOČICA	5
POZICIONIRANJE OBRATKA	10
IZDRADA ON LINE PROGRAMA	10
ZAVARIVANJE	2
VRIJEME ČEKANJA MEĐUPROLAZNE TEMPERATURE	45
UKUPNO VRIJEME PROCESA	87

Tablica 21. Prikaz ukupnog trajanja procesa pripreme i zavarivanja – MAG postupak

OPERACIJE – MAG POSTUPAK	Vrijeme trajanja, min
PRIPREMA I IZRADA K SPOJA	60
BRUŠENJE POVRŠINA - MAG	10
PRIPAJANJE	10
MONTAŽA KERAMIČKIH PLOČICA	5
POZICIONIRANJE OBRATKA	10
IZRADA ON LINE PROGRAMA (VIŠEPROLAZNO)	50
ZAVARIVANJE (VIŠEPROLAZNO, NJIHANJE...)	6,40
PROSJEČNO VRIJEME ČEKANJA MEĐUPROLAZNE TEMPERATURE	20
UKUPNO VRIJEME PROCESA	171,4

Na slici 56 prikazan je odnos vremena trajanja procesa kod *D–Arc* i konvencionalnog MAG postupka.



Slika 55. Odnos trajanja oba postupka pripreme i zavarivanja kutnog spoja

S aspekta proizvodnosti dobiveni podaci su na strani *D–Arc* tehnologije zavarivanja. Najveća razlika i prednost se dobiva u samom procesu zavarivanja jer se kod konvencionalnog MAG robotiziranog postupka radi o višeprolaznom zavarivanju te se automatski javlja potreba za opširnijim programiranjem i manipulacijom radnog komada. Naravno, da se u slučaju serijske proizvodnje vremena kreiranja programa smanjuju, no ipak mogućnost pojave problematike je sigurno veća kod višeprolaznog zavarivanja, jer komadi prilikom novog pozicioniranja nisu uvijek u savršeno istoj poziciji.

Završnom usporedbom i analizom oba provedena robotizirana postupka može se detaljnije definirati i upoznati relativno nova tehnologiju, odnosno sustav zavarivanja *D-Arc*. Naime krajnji rezultati, provedena ispitivanja i analize sugeriraju na slična svojstva dobivenih zavara, no međutim međuoperacije i procesi te sam postupak dobivanja zavara je različit od postupka do postupka. U tablici 22 prikazani su osnovni kriteriji odabira jednog od postupka te prednosti i nedostaci istih.

Tablica 22. Prednosti i nedostaci oba provedena postupka prema odabranim kriterijima

KRITERIJ	POSTUPAK	
	D–ARC	MAG KONVENCIONALNI
Intermitencija	+	-
Brzina zavarivanja	+	-
Mogućnost jednoprolaznog zavarivanja debljih stijenki (do 20 mm)	+	-
Geometrija zavara (uglađenost površine)	+/-	+
Pojava nepravilnosti u zavaru	+/-	+
Mikrostruktura	+/-	+
Proizvodnost	+	-
Spektar debljina stijenki koji se zavaruje	-	+
Cijena investicije u opremu (robotizirani sustav)	-	+
Pojava deformacija tijekom zavarivanja	+	-
Mogućnost primjene postupka na raznorodnim metalima	-	+
Jednostavnija priprema/izvedba spoja	+	-

ZAKLJUČAK

Visokoučinsko zavarivanje, preciznije novorazvijeno područje zavarivanja *D–Arc* postupkom otvara nove mogućnosti i napredak u zavarivačkoj industriji. Uz primjenu stabiliziranog zakopanog luka uz kojeg se koriste novi valni oblici osnovnih parametara moguće je ostvarivati duboku penetraciju, jednoprolazno zavarivanje debljih limova, što je uz primjenu dosadašnjih postupaka teško, pa i nemoguće ostvariti.

S teorijskog aspekta, kod zavarivanja debelostjenih konstrukcija koje su načinjene od nelegiranog čelika, *D–Arc* se čini kao savršen postupak u definiranim uvjetima rada zbog zahtjeva robotiziranog zavarivanja. Usprkos tome što je relativno nova tehnologija, definitivno ima prostora za napredak i uspješnu primjenu u industriji.

Na temelju eksperimentalnog dijela koji podrazumijeva cijeli proces od planiranja, pripreme, zavarivanja te kasnijih ispitivanja, analiza i usporedbe oba postupka (*D–Arc* i MAG konvencionalni) može se zaključiti sljedeće:

- Oprema robotiziranog *D-Arc* postupka obuhvaća nekoliko uređaja koji su kompleksniji i skuplji od robotske ćelije konvencionalnog MAG-a. Zbog dvostrukog izvora struje, sustav zahtjeva intenzivnije hlađenje pištolja, no pozitivna posljedica toga je mogućnost većih unosa topline, bolje karakteristike izvora u pogledu intermitencije i sl. Također ćelija ima kompleksniji sustav dobave žice koji osigurava stabilizirani zakopani luk prilikom samog procesa zavarivanja.
- Kod pripreme spoja glavna prednost *D–Arc* sustava je da su zahtjevi za pripremu značajno manji u odnosu na konvencionalni postupak. Time se dobiva na povećanju proizvodnosti, uz kasnije dobivene identične provare u kutnom spoju. Kod *D-Arc* postupka pripreme kutnog spoja nije bilo ukoliko se ne uračunava čišćenje površine, dok MAG postupak zahtijeva otvaranje površine za zavarivanje, u ovom slučaju K spojem.
- Tehnologije provedenih postupaka imaju nekoliko bitnih različitosti. Dok s postupkom zavarivanja zakopanim lukom uspijevamo zavariti kutni spoj u jednom prolazu sa svake strane, kod konvencionalnog MAG-a to ostvarujemo s ukupno 5 prolaza, s time da je to minimiziran iznos prolaza.

- Iz provedene kontrole, ispitivanja i analize rezultata definira se sljedeće:
    - Iz vizualne kontrole zaključuje se da su oba zavara djelomično provarena, no s minimalnim podešavanjem parametara (nagib pištolja) kod oba postupka može se postići potpuni provar. Usporedbom uzoraka C i B dolazimo do činjenice da su površine metala zavara vrlo slične, s time da je ZUT kod uzorka C većih dimenzija. Ujednačenija i simetrična geometrija zavara postiže se na uzorku C dok se kod uzorka B može uočiti bolja uglađenost površine zavara.
    - Analizom radiografskih snimki nisu uočene neke velike nepravilnosti na oba uzorka, no ipak se može izdvojiti veći i različitiji broj nepravilnosti kod uzorka C, što sugerira da ipak postoji veća vjerojatnost za pojavu grešaka kod *D–Arc* postupka zavarivanja.
    - Mjerenjem i analizom tvrdoće dolazi se do zaključka da su iznosi tvrdoća uzorka C i B poprilično usporedivih i sličnih iznosa. Prema tome svojstva spojeva oba uzorka su slična. Naknadno iz grafičkih prikaza tvrdoća proizlazi da se prema unutrašnjosti tvrdoća povećava, odnosno udarna radnja loma pada, dok čvrstoća spoja raste. Taj fenomen može se povezati s činjenicom da u početnim stadijima zavarivanja radni komad nije bio predgrijavan, a zbog veće debljine stijenke osnovnog materijala dolazi do intenzivnijeg odvođenja topline, bržeg hlađenja i samim time otvrdnjavanjem spoja. Najveći iznosi tvrdoća oba uzorka su u zoni linije staljivanja i tu su svojstva uzorka najlošija. U tom području sa strane ZUT-a javljaju se povećane dimenzije zrna, kao i sa strane metala zavara.
- Završnom ekonomskom analizom dolazi se do rezultata da se za ostvarivanje identičnih spojeva utroši manje vremena kod *D–Arc* postupka. Kod serijske proizvodnje to igra veliku ulogu, s time da se i intermitencije izvora razlikuju u korist *D–Arc-a*. Priprema spoja kompleksnija je kod konvencionalnog zavarivanja, mogućnost pojave greški veća je kod zakopanog luka, dok je prednost konvencionalnog raširenji spektar zavarivanja, postizanje pogodnije mikrostrukture uz podešavanje parametara kod višeprolaznog zavarivanja.

Zaključno, D–Arc postupak zavarivanja u ranim stadijima istraživanja postiže pozitivne rezultate i za primjenu kod zavarivanja materijala debljih stijenki predstavlja ozbiljnu tehnologiju koja se može implementirati u mnogim granama industrije.

LITERATURA

[1] Vuherer, T., Garašič, I., Kastelic, P.: Properties of Butt-weld joint welded by new D-arc process, Doc.XII-2373-18 /212-1537-18 /IV-1374-18, FSB Zagreb, Slovenija, 2018.

[2] Hayato, B.: Single pass full penetration joining for heavy plate steel using high current GMA process (D-ARC); Zbornik radova zavarivačke tehnologije, Japan, 2017.

[3] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[4] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[5] Kožuh, Z., Garašić, I.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Izdanje 2016., Zagreb, 2016.

[6] Lončar, D.: Priručnik za zavarivanje; Elektroda zagreb, Zagreb, 1987.

[7] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[8] http://ej.iop.org/images/0022-3727/47/46/465204/Full/d502931f01_online.jpg,IOP science, preuzetona 22.4.2018.

[9] Dzelnitzki, D.: Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja, Zavarivanje vol.55, pp. 15.-21., siječanj-travanj, 2012.

[10] Bilandžija, J.: Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, diplomsku rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[11] Japan Welding Society Advanced Welding & Joining Technologies. SANPO PUBLICATIONS: 48., Japan, 2005.

[12] J.K. Kristensen Thick Plate CO2-Laser Based Hybrid Welding of Structural Steels. Welding in the World Volume 53 Issue 1: 48-57., 2009.

[13] Steve Shi et al. Laser and hybrid laser-MAG welding of steel structures for shipbuilding. International Forum on Welding Technologies in Shipping Industry held in Shanghai, 2007.

[14] Eakkachai Wainsiriruk Oblique laser irradiation technique for vertical welding of thick steel plates employing hot-wire laser welding. Quarterly Journal of the Japan Welding Society Vol. 33 No.4: 326-331., Japan, 2015.

[15] Ruoyang Li et al. A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method. Optics & Laser Technology Volume 64, Dec: 172-183., 2017.

[16] Y Shimokusu et al. Application of pulse-modulated high-power YAG laser to welding of heavy plates. Welding International Volume 17 Issue 7: 534-540., Japan, 2003.

[17] G. Zeng. Plasma arc welding principle and application. Welding and Cutting Vol.9 No.1: 38-44., Japan, 1989.

[18] X. R. Li et al. Double stage plasma arc pipe welding process. Welding Journal Vol. 91:346-353., 2012.

[19] J. S. Shih et al. Multi-objective process optimization of pulsed plasma arc welding SS400 steel pipe with foamed aluminum liner. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. Vol.6 No.2: 222-235., 2012.

[20] Masatoshi Murayama et al. Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies. JFE TECHNICAL REPORT 20 (Mar.): 147-153. Japan, 2012.

[21] Hayato, B., Tetsuo, E., Tomoyuki, U., Manabu, T.: Razvoj visokoučinskog zavarivanja čelika za debele limove primjenom zakopanog električnog luka velike struje, Zavarivanje vol.60, pp. 121.-127., rujan-prosinac, Zagreb, 2017.

[22] Noriyuki Muraoka et al. Effect of Power Output Modulation on Weld Profile in CO2 Welding. Preprints of the National Meeting of JWS 2015s: 134-135, Japan, 2015.

[23] Hirotaka Adachi et al. Metal Transfer Phenomena in High-current MAG Welding. Preprints of the National Meeting of JWS 2006f: 112-113, Japan, 2006.

[24] Hayato Baba et al. Study on arc stabilization for high current buried arc – Development of GMA welding system with ultra-high wire feed rate (first report) - . Preprints of the National Meeting of JWS 2016s: 170-171, Japan, 2016.

[25] Katsuyuki Tsuji et al. Robot Welding Process for medium and Heavy Plate. KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW 32(DEC.):9-15, Japan, 2013.

[26] Masao Ushio et al. Effects of Shielding Gas Composition on Metal Transfer Phenomena in High Current GMA Welding. Trans. JWRI, 2(1):7-12, Japan, 1993.

[27] Hayato baba Thick plate welding by "D-Arc welding" using high current buried arc. Welding technology Vol. 64 No. 9: 78-82, Japan, 2016.

[28] Ratajec, M.: Sistematizacija ispitnih metoda za određivanje zavarljivosti, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

PRILOZI

CD-R disc